

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE CHICULOAPAN

Ingeniería en Energías Renovables

Implementación de un Sistema de Digestión Anaerobia y
Elaboración de un Manual para el Aprovechamiento de RSO
en el TESH

Tesis profesional

Que para obtener el Grado de

Ingeniera en Energías Renovables

P R E S E N T A

NAIDELIN GARCÍA RODRÍGUEZ

Directora: Biol. Beatriz Rivera Olivares

Co-Director: M. en IQ. Miguel Sergio Hernández Jiménez



Chicoloapan de Juárez, Estado de México a febrero de 2026

Presentación y directorio de los asesores

El presente trabajo realizado bajo la modalidad de Tesis profesional, titulada Implementación de un Sistema de Digestión Anaerobia y Elaboración de un Manual para el Aprovechamiento de RSO en el TESCH y que ha sido realizado por la alumna **Naidelin García Rodríguez** con matrícula 20020010 la cual ha sido aprobada al igual que aceptada como requisito para obtener el grado de **Licenciatura** en:

Ingeniería en Energías Renovables

Directora:



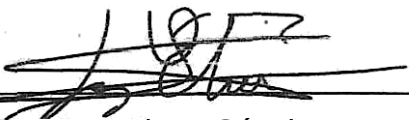
Biol Beatriz Rivera Olivares

Co—Director:



M. en IQ. Miguel Sergio Hernández Jiménez

Revisor



Mtra Luz Elena Sánchez Reyes

Revisor



Dr. Carlos Alberto Cortés Rodríguez

I. Agradecimientos

En primera instancia, agradezco a la vida, a la **Pachamama** y al universo por brindarme la fortaleza necesaria para avanzar en este proyecto. Esta experiencia fortaleció mi vínculo con la naturaleza y me permitió reconocer su valor, así como comprender la importancia de respetarla y cuidarla como parte fundamental de nuestra existencia.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mis padres, **Gerardo García Morales** y **María de los Ángeles Rodríguez Goytia**, por ser los pilares fundamentales de mi formación personal. De manera especial, agradezco a **mi madre**, quien ha sido un apoyo constante durante todo este proceso. A pesar de las dificultades, siempre me brindó acompañamiento, consejos y el aliento necesario para continuar. Su amor, fortaleza y sacrificios han sido una guía invaluable en mi vida, y hoy reconozco profundamente todo lo que ha hecho por mí y por mi familia.

Agradezco profundamente a mis abuelitos, **Raquel Morales Mata** y **Santiago García Rodríguez**, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida. Gracias por su amor, paciencia y apoyo incondicional, por creer en mí incluso en los momentos en los que dudé de mis capacidades. Su confianza y palabras de aliento fueron esenciales para seguir adelante cuando el camino se tornó difícil. Este logro también les pertenece.

A mis hermanos, **Gerardo García Rodríguez**, **Paulina García Rodríguez** y **Jafit Mateo Pérez Rodríguez**, gracias por caminar conmigo durante este proceso, por su paciencia en mis días más vulnerables, por regalarme sonrisas cuando más las necesitaba y por inspirarme a ser mejor y no rendirme.

Agradezco especialmente a mi prometido, **Adrián Ortiz Vargas**, por su acompañamiento incondicional, paciencia y apoyo constante durante el desarrollo de este proyecto. Su comprensión, motivación y presencia fueron fundamentales para brindarme calma y fortaleza en los momentos de mayor dificultad.

Extiendo mi agradecimiento a las personas que estuvieron presentes durante esta etapa, en particular a mi papá de corazón, **Miguel González Rodríguez**, por ser un pilar importante durante este proceso, por sostenerme siempre, confiar en mí y sentirse orgulloso de lo que he construido. Asimismo, agradezco a mi abuelita **Carmen Goytia** por su apoyo, a mi mejor amiga **Litzy Naomi** y a la familia que me ha acompañado durante este proceso, por su motivación y palabras de aliento.

En el ámbito académico, agradezco profundamente a la **Biol. Beatriz Rivera Olivares, directora de este proyecto**, por su acompañamiento durante todo el desarrollo de la investigación. Su tiempo, paciencia, dedicación y compromiso fueron fundamentales para fortalecer mis capacidades, ampliar mi aprendizaje y enfrentar los retos presentados durante este proceso. Asimismo, agradezco la confianza brindada y el apoyo que hizo posible la vinculación con la **Universidad Autónoma Metropolitana**, experiencia que contribuyó significativamente a mi formación profesional.

Agradezco sinceramente al **Mtro. Miguel Sergio Hernández Jiménez** por brindarme la oportunidad de colaborar con la **Universidad Autónoma Metropolitana** y por su **codirección**, orientación y apoyo constante durante la elaboración de esta tesis. Sus conocimientos y experiencia fortalecieron mi formación académica y ampliaron mi visión profesional.

Agradezco al **Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan** por brindarme la formación académica como **Ingeniera en Energías Renovables**, así como por proporcionar las herramientas necesarias para mi desarrollo profesional. De igual forma, expreso mi más sincero agradecimiento a las y los docentes del Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan por su apoyo durante mi proceso académico.

De manera especial, agradezco a la **Dra. Nallely Rosas Flores** por su acompañamiento y por brindarme la oportunidad de participar en actividades que contribuyeron a mi desarrollo profesional. También, agradezco al **Dr. Carlos A. Cortés**

Rodríguez por compartir sus conocimientos y brindar asesorías que contribuyeron al desarrollo de este trabajo.

De igual forma, agradezco a la **Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa**, por permitirme colaborar con su comunidad académica y acceder a sus instalaciones, experiencia que enriqueció significativamente mi formación y fortaleció mi interés por la investigación. Del mismo modo, extendiendo mi agradecimiento al programa **Casa UAM**.

Reconozco el apoyo de la **Dra. Teresa García**, de la Universidad Autónoma Metropolitana, por compartir sus conocimientos, facilitar el uso de equipo especializado y contribuir a mi aprendizaje durante esta etapa.

Finalmente, agradezco a las alumnas de la Universidad Autónoma Metropolitana, **Ita** y **Dariela**, así como al **Ing. Miguel** y a la **Mtra. Adriana**, por su acompañamiento, por compartir sus conocimientos y por el apoyo brindado durante el desarrollo de mi proyecto.

II. Resumen

El manejo inadecuado de los residuos sólidos orgánicos (RSO) representa una problemática ambiental significativa debido a su contribución a la contaminación y a la generación de gases de efecto invernadero. En este contexto, la digestión anaerobia se presenta como una alternativa sostenible para el aprovechamiento de estos residuos, permitiendo la producción de biogás como fuente de energía renovable y la obtención de biofertilizantes con valor agronómico.

La presente investigación tuvo como objetivo implementar y evaluar un biodigestor a escala piloto para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan. Para ello, se realizó la recolección y cuantificación de los residuos sólidos orgánicos durante el periodo comprendido de marzo a noviembre, con el fin de determinar su disponibilidad y variación temporal. Los resultados obtenidos mostraron que el mes con mayor generación de residuos fue marzo, con un total de 29 kg, evidenciando la variabilidad en la generación de residuos a lo largo del periodo de estudio.

Posteriormente, los residuos recolectados fueron utilizados como sustrato en un biodigestor, donde se evaluó el proceso de digestión anaerobia y la producción de biofertilizante. Asimismo, se realizaron análisis para observar las características del biofertilizante obtenido, permitiendo identificar la presencia de materia orgánica estabilizada y actividad microbiológica.

Los resultados obtenidos demostraron que la implementación del biodigestor permitió el aprovechamiento eficiente de los residuos sólidos orgánicos, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental y al mismo tiempo generando un subproducto con potencial aplicación como fertilizante. Esta investigación aporta evidencia sobre la viabilidad del uso de biodigestores como una alternativa sostenible para el manejo integral de los residuos sólidos orgánicos en instituciones educativas, promoviendo el aprovechamiento de recursos y el desarrollo de tecnologías limpias.

III. Abstract

The improper management of organic solid waste (OSW) represents a significant environmental problem due to its contribution to pollution and the generation of greenhouse gases. In this context, anaerobic digestion is presented as a sustainable alternative for the use of this waste, allowing the production of biogas as a renewable energy source and the obtaining of biofertilizers with agronomic value.

The objective of this research was to implement and evaluate a pilot-scale biodigester for the use of organic solid waste generated at the Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan. To this end, organic solid waste was collected and quantified during the period from March to November in order to determine its availability and temporal variation. The results obtained showed that the month with the highest waste generation was March, with a total of 29 kg, evidencing the variability in waste generation throughout the study period.

Subsequently, the collected waste was used as substrate in a biodigester, where the anaerobic digestion process and biofertilizer production were evaluated. Analyses were also carried out to observe the characteristics of the biofertilizer obtained, allowing the presence of stabilized organic matter and microbiological activity to be identified.

The results obtained demonstrated that the implementation of the biodigester allowed for the efficient use of organic solid waste, contributing to the reduction of environmental impact and at the same time generating a by-product with potential application as fertilizer. This research provides evidence on the viability of using biodigesters as a sustainable alternative for the comprehensive management of organic solid waste in educational institutions, promoting the use of resources and the development of clean technologies

Índice

I.	Agradecimientos	i
II.	Resumen	iv
III.	Abstract	v
1.	Introducción	11
2.	Antecedentes	13
3.	Marco teórico	15
3.1.	<i>Residuos Sólidos Urbanos (RSU)</i>	<i>15</i>
3.2.	<i>Residuos Sólidos Orgánicos (RSO)</i>	<i>15</i>
3.2.1	Tipos y fuentes de generación de RSO.....	16
3.2.2	Manejo y aprovechamiento de los (RSO).....	17
3.2.3	Estrategias de aprovechamiento de los RSO	17
3.2	<i>Biomasa</i>	<i>18</i>
3.3	<i>Biogás</i>	<i>19</i>
3.3.1	Biogás en el ámbito mundial	19
3.3.2	El Biogás en México	20
3.3.3	Producción de biogás mediante digestión anaerobia.....	21
3.4.	<i>Digestión Anaerobia</i>	<i>22</i>
3.4.1	Condiciones del proceso anaerobio	23
3.4.2	Etapas de la digestión anaerobia.....	23
3.5	<i>Biodigestores</i>	<i>25</i>
3.5.1	Componentes de un biodigestor	25
3.5.2	Tipos de biodigestores	25
3.5.3	Productos de los biodigestores	27

3.6	<i>Marco normativo para la implementación de biodigestores en el ámbito educativo y urbano</i>	27
3.6.1	Leyes generales y políticas nacionales	28
3.6.2	Normas oficiales mexicanas (NOM) y requisitos técnicos aplicables	28
4.	Planteamiento del problema	30
5.	Hipótesis	31
6.	Objetivos	32
6.1	<i>General</i>	32
6.2	<i>Específicos</i>	32
7.	Metodología	33
7.1	<i>Etapas 1. Recolección, cuantificación y caracterización de los RSO</i>	33
7.1.1	Recolección, separación y caracterización de los RSO	33
7.1.2	Cuantificación y preparación física de los RSO	34
7.1.3	Almacenamiento	34
7.1.4	Proceso previo a la alimentación del biodigestor	34
7.2	<i>Etapas 2. Aplicación de encuesta a la comunidad del TESCH</i>	36
7.2.1	Población y muestra	36
7.2.2	Elaboración y aplicación del instrumento	36
7.2.3	Análisis estadístico	37
7.3	<i>Etapas 3: Relación Carbono-Nitrógeno</i>	38
7.3.1	Preparación de muestras	38
7.3.2	Determinación de parámetros	39
7.3.3	Etapas 3.1 Análisis de microscopía electrónica de barrido	39
7.4	<i>Etapas 4: Elaboración de un manual de implementación, manejo y mantenimiento del sistema de digestión anaerobia.</i>	40

8. Resultados y discusión.....	41
8.1. <i>Etapas 1. Recolección, cuantificación y caracterización de los RSO</i>	41
8.1.1 Generación semanal de RSO en el TESCH.....	42
8.1.2 Generación mensual de RSO en el TESCH	45
8.1.3 Monitoreo de parámetros del biodigestor	49
8.2 <i>Análisis de conglomerados del nivel de conocimiento sobre RSO.....</i>	54
8.3 <i>Etapas 3: Relación Carbono Nitrógeno y análisis de microscopía electrónica de barrido.</i>	68
8.3.1 Relación Carbono Nitrógeno de Gallinaza con 8 meses de operación del biodigestor.	68
8.3.2 Relación Carbono Nitrógeno de Vacuno con 5 meses de operación del biodigestor.	71
.....	75
8.4 <i>Manual de manejo y aprovechamiento de RSO y la implementación y mantenimiento de un sistema de digestión anaerobia.....</i>	76
8.5 <i>Sobre la discusión.....</i>	77
9. Conclusiones.....	80
10. Referencias	81
11. Anexos.....	85
11.1 <i>Anexo 1. Encuesta.....</i>	85
11.2 <i>Anexo 2. Manual.....</i>	87

Ilustración 1. Clasificación de Residuos Sólidos.	15
Ilustración 2. Clasificación general de la biomasa según su origen y contenido de humedad.	18
Ilustración 3. Distribución global del potencial del técnico de producción de biogás y biometano.....	20
Ilustración 4. Distribución del potencial técnico de biogás en México por entidad federativa.....	21
Ilustración 5. Etapas de la digestión anaerobia.	24
Ilustración 6. Generación mensual de RSO.	46
Ilustración 7. Dendrograma que utiliza el método de Ward.....	55
Ilustración 8. Adscripción dentro del TESCH por grupo de nivel de conocimiento sobre los RSO.....	56
Ilustración 9. Conocimiento sobre los RSO.....	57
Ilustración 10. Identificación de los Residuos Sólidos Orgánicos (RSO).....	58
Ilustración 11. Separación de los Residuos Sólidos Orgánicos (RSO) en casa.	59
Ilustración 12. Destino final de los Residuos Sólidos Orgánicos (RSO) en casa.	60
Ilustración 13. Beneficios del aprovechamiento de los Residuos Sólidos Orgánicos.	61
Ilustración 14. Conocimiento del composteo.	62
Ilustración 15. Conocimiento de vermicompost y lombricomposta en la comunidad educativa del TESCH.	63
Ilustración 16. Conocimiento de los biodigestores en la comunidad educativa del TESCH.	64
Ilustración 17. Elaboración de composta o biodigestores.	65
Ilustración 18. Participación en programas de reciclaje o manejo de RSO.	66
Ilustración 19. Propuestas para mejorar el manejo de RSO en el TESCH.....	67
Ilustración 20. Participación de talleres sobre compostaje y biodigestores en el TESCH.	68
Ilustración 21. Microestructura del biol de gallinaza observada mediante microscopía electrónica de barrido (1000 x).....	70
Ilustración 22. Microestructura del biol observada mediante microscopía electrónica de barrido (1000 x).....	71

Ilustración 23. Microestructura del biol observada mediante microscopía electrónica de barrido (1000 x).....	74
Ilustración 24. Microestructura del biol observada mediante microscopía electrónica de barrido (1000 x).....	75
Ilustración 25. Portada del Manual	76
Tabla 1. Principales fuentes de generación de RSO	16
Tabla 2. Clasificación de los microorganismos del proceso de digestión anaerobia .	22
Tabla 3. Tipos de biodigestores más comunes	26
Tabla 4. Tipos de residuos identificados en la generación del TESCH.	42
Tabla 5. Generación de RSO semanal en el TESCH	42
Tabla 6. Componentes de carga Inicial	47
Tabla 7. Cargas de Alimentación	48
Tabla 8. Parámetros de monitoreo	50
Tabla 9. Componentes de carga inicial sistema a mayor a escala.....	51
Tabla 10. Cargas de alimentación sistema a escala mayor.	53
Tabla 11. Concentraciones de carbono total, carbono inorgánico y nitrógeno total del biofertilizante de gallinaza.	69
Tabla 12. Concentraciones de carbono total, carbono inorgánico y nitrógeno total del biofertilizante de excretas de vacuno.	71

1. Introducción

El manejo de los residuos sólidos orgánicos representa uno de los principales desafíos ambientales a nivel mundial debido al incremento sostenido en su generación y a las limitadas estrategias para su tratamiento y aprovechamiento. El crecimiento poblacional, los cambios en los patrones de consumo y la urbanización han contribuido a un aumento significativo en la producción de residuos, lo que exige el desarrollo de alternativas tecnológicas orientadas a su gestión integral. La disposición inadecuada de residuos orgánicos favorece la emisión de gases de efecto invernadero, particularmente metano, así como la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, generando impactos ambientales y sanitarios relevantes [1].

Los residuos orgánicos, provenientes principalmente de restos de alimentos y materia biodegradable, constituyen una fracción significativa de los residuos sólidos urbanos. Sin embargo, además de representar un problema ambiental, también poseen un alto potencial de aprovechamiento debido a su contenido de materia orgánica y nutrientes. Cuando son gestionados mediante procesos adecuados, pueden transformarse en recursos energéticos y agrícolas, promoviendo esquemas de economía circular y reducción de residuos destinados a disposición final.

Entre las alternativas tecnológicas disponibles destaca la digestión anaerobia, proceso biológico mediante el cual microorganismos degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando biogás compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) y subproductos con potencial de aprovechamiento agrícola. La aplicación de esta tecnología permite no solo reducir el volumen de residuos, sino también recuperar energía y nutrientes, integrando criterios ambientales y energéticos en un mismo sistema. Diversas investigaciones han señalado la viabilidad de esta tecnología como estrategia para el manejo integral de residuos y la generación de energía renovable [2].

En el ámbito institucional, las instituciones educativas representan espacios estratégicos para la implementación de tecnologías sustentables, debido a la generación constante de residuos orgánicos derivada de actividades de consumo, particularmente en cafeterías. Además de su función académica, estas instituciones

pueden convertirse en entornos demostrativos para la aplicación de soluciones ambientales, fortaleciendo la cultura de sustentabilidad dentro de la comunidad educativa.

En el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, los residuos orgánicos generados principalmente en la cafetería son destinados en su mayoría a disposición final, sin esquemas formales de aprovechamiento. Esta situación evidencia la necesidad de desarrollar alternativas técnicas que permitan su transformación y contribuyan a la gestión sustentable dentro de la institución. La implementación de tecnologías de valorización no solo permitiría reducir el impacto ambiental asociado a la disposición convencional, sino también fomentar prácticas responsables entre estudiantes, docentes y personal administrativo.

La implementación de un sistema de digestión anaerobia a escala piloto permite analizar el comportamiento del proceso bajo condiciones reales de generación de residuos y obtener información técnica sobre su funcionamiento operativo. Este tipo de sistemas facilita la identificación de variables relevantes para la estabilidad del proceso, así como la adaptación de la tecnología a contextos específicos. Asimismo, el aprovechamiento del biogás y del biofertilizante obtenido puede fortalecer estrategias institucionales orientadas a la reducción del impacto ambiental y al uso eficiente de recursos.

En este sentido, la presente investigación tiene como objetivo general la implementación de un sistema de digestión anaerobia a escala piloto para el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan. Mediante la cuantificación y caracterización de los residuos, el monitoreo de las condiciones operativas y el análisis de la producción de biofertilizante, se busca generar información que permita determinar su comportamiento técnico como alternativa para la gestión sustentable de residuos en entornos educativos.

2. Antecedentes

La digestión anaerobia es una tecnología consolidada para el tratamiento de residuos orgánicos y la producción de biogás, cuya eficiencia depende de la composición del sustrato y de las condiciones operativas del sistema. Estudios recientes muestran que parámetros como los sólidos totales, la relación carbono-nitrógeno (C/N) y la carga orgánica son determinantes para la estabilidad y el rendimiento metanogénico de los biodigestores [3].

Diversos manuales y revisiones técnicas han señalado que el biofertilizante subproducto de la digestión anaerobia contiene fracciones de materia orgánica estabilizada y nutrientes minerales (nitrógeno, fósforo y potasio) que le confieren potencial como enmienda o biofertilizante, aunque su calidad final depende del sustrato y del tiempo/condiciones de estabilización. Por lo que, la relación Carbono/Nitrógeno (C/N) es un componente recurrente en estudios que evalúan su aplicabilidad agrícola [4].

La relación carbono-nitrógeno (C/N) es utilizada sistemáticamente como indicador de la idoneidad del sustrato y de la calidad del digestato: valores extremos (muy altos o muy bajos) pueden provocar inhibiciones o limitar la mineralización de nutrientes. Por ello, muchos estudios incorporan determinaciones de carbono total, nitrógeno total y cálculo de C/N para interpretar la aptitud del digestato como biofertilizante y su efecto en la estabilidad microbiológica del proceso [5].

En México, la literatura técnica y los estudios regionales muestran un interés creciente por la adopción de biodigestores tanto a escala rural como a escala mayor en sistemas pecuarios. Trabajos y reportes nacionales describen experiencias de implementación en granjas porcinas y bovinas, evaluaciones del potencial de generación de biogás y la utilidad del digestato como insumo para la agricultura local [6] Estos documentos también señalan desafíos operativos (variabilidad de sustratos, necesidad de monitoreo de temperatura y pH, diseño adecuado del reactor) que coinciden con las determinaciones experimentales en contextos similares [7].

Desde el punto de vista de la degradación estructural, el análisis de la fracción fibrosa mediante el método de detergentes propuesto por Van Soest permite estimar la

proporción de hemicelulosa, celulosa y lignina en los sustratos, información útil para predecir su degradabilidad en procesos de digestión anaerobia [8].

Complementariamente, la microscopía electrónica de barrido (SEM) se ha empleado como herramienta complementaria para observar cambios morfológicos en fibras y agregados después de la digestión, aportando evidencia visual sobre el grado de desestructuración de la materia orgánica. En cuanto a la metodología de referencia, múltiples estudios similares al presente han combinado análisis fisicoquímicos (C, N, P, C/N), monitoreo de condiciones operativas (temperatura, pH) y caracterización microscópica (SEM) para evaluar la calidad del digestato y su potencial de uso agrícola. Esta combinación metodológica facilita la comparación entre trabajos y permite relacionar parámetros operativos con la calidad final del biofertilizante [9].

Finalmente, en el contexto normativo mexicano, la implementación de biodigestores y el aprovechamiento de residuos orgánicos se encuentra respaldado por diversas leyes y normas ambientales. La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente establece los principios para prevenir la contaminación y promover el uso de tecnologías limpias [10] Al igual que, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos regula el manejo adecuado de los residuos sólidos urbanos y promueve su valorización [11] De igual forma, la Ley de Transición Energética impulsa el uso de fuentes renovables como el biogás [12]. Complementariamente, la NOM-083-SEMARNAT-2003 [13] Establece lineamientos para la disposición y valorización de residuos sólidos, la NOM-001-SEMARNAT-2021 [14] Regula la calidad de las descargas de aguas residuales, incluyendo el biofertilizante líquido, y la NOM-044-SEMARNAT-2017 [15] Regula las emisiones de motores que utilizan combustibles alternativos como el biogás, garantizando la protección ambiental y el uso sostenible de estos sistemas.

3. Marco teórico

3.1. Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

Los residuos sólidos urbanos (RSU) comprenden el conjunto de desechos generados por las distintas actividades humanas en áreas urbanas, incluyendo actividades domésticas, comerciales y de servicios. Estos residuos pueden clasificarse en diferentes categorías, tales como residuos sólidos orgánicos, residuos sólidos inorgánicos, residuos de manejo especial y residuos peligrosos, de acuerdo con su composición y características de manejo [16]

Como se muestra en la Ilustración 1, los Residuos Sólidos Urbanos se clasifican por color, siguiendo el esquema utilizado en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos para su identificación y manejo.

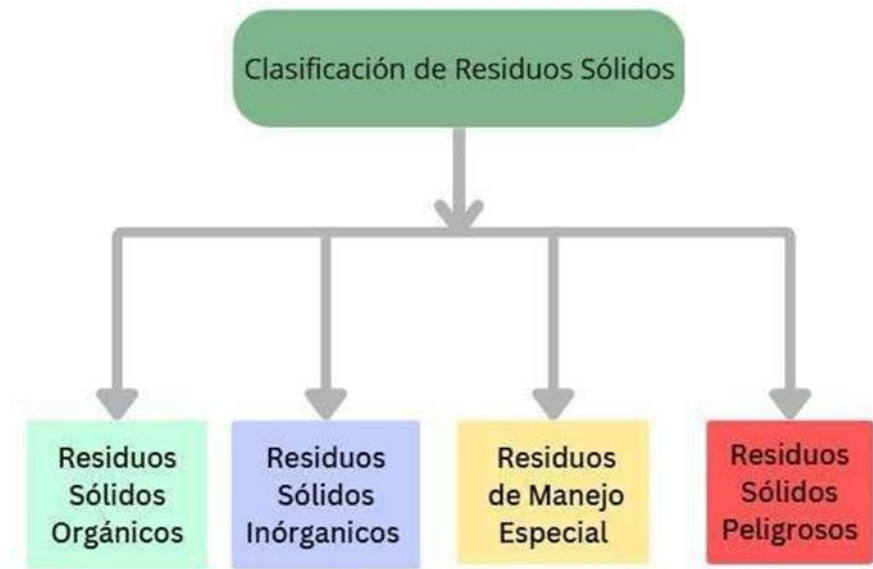


Ilustración 1. Clasificación de Residuos Sólidos.

Fuente: Elaboración propia con base en SEMARNAT [16].

3.2. Residuos Sólidos Orgánicos (RSO)

De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), los residuos sólidos orgánicos corresponden a la fracción biodegradable de los residuos sólidos urbanos, compuesta principalmente por restos de alimentos, residuos vegetales y estiércoles de origen animal [16].

3.2.1 Tipos y fuentes de generación de RSO

3.2.1.1 Tipos de RSO clasificación básica

Los RSO pueden clasificarse de acuerdo con su origen y composición. De manera general, incluyen restos de alimentos, residuos vegetales de jardinería, residuos agrícolas, estiércol de origen animal y fracciones orgánicas de residuos urbanos [17].

3.2.1.2 Fuentes de generación de RSO

Las principales fuentes de generación de residuos sólidos orgánicos se concentran en distintos sectores de la actividad humana. Entre las más relevantes se encuentran los hogares, los mercados y establecimientos de alimentos, las áreas verdes urbanas, el sector agrícola y pecuario, así como los comedores y restaurantes [17].

En la Tabla 1. Se presentan las principales fuentes de generación de RSO y los tipos de residuos asociados a cada una, de acuerdo con su origen en los distintos sectores de la actividad humana. Esta clasificación permite identificar los residuos con mayor potencial de aprovechamiento mediante procesos como la digestión anaerobia y el compostaje, facilitando la planeación de estrategias de manejo y valorización de los RSO.

Tabla 1. Principales fuentes de generación de RSO

<i>Fuente de generación</i>	<i>Tipo de residuo orgánico</i>
<i>Hogares</i>	Restos de comida, cáscaras y sobrantes
<i>Mercados</i>	Frutas y verduras en descomposición
<i>Jardinería</i>	Hojas, pasto y ramas
<i>Agricultura</i>	Residuos de cosecha
<i>Ganadería</i>	Estiércol

Elaboración propia con base en SEMARNAT [17].

3.2.2 Manejo y aprovechamiento de los (RSO)

El manejo de los residuos sólidos orgánicos (RSO) comprende el conjunto de acciones orientadas a su recolección, separación, almacenamiento, tratamiento y disposición final, con el objetivo de reducir sus impactos ambientales y sanitarios. En México, la gestión integral de residuos promueve la valorización de la fracción orgánica como estrategia prioritaria para disminuir el volumen destinado a disposición final y favorecer el aprovechamiento de recursos [17] El aprovechamiento de los RSO constituye una alternativa sustentable que permite transformar estos residuos en productos útiles, tales como abonos orgánicos y bioenergía, contribuyendo a la economía circular mediante la reincorporación de nutrientes y energía al sistema productivo [18].

3.2.3 Estrategias de aprovechamiento de los RSO

Entre las principales estrategias de aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos se encuentran el compostaje, la vermicompostaje y la digestión anaerobia.

El compostaje es un proceso biológico aeróbico mediante el cual microorganismos degradan la materia orgánica, generando un producto estabilizado rico en nutrientes, ampliamente utilizado como mejorador de suelos [5] Este proceso permite reducir patógenos y estabilizar la materia orgánica, favoreciendo su aplicación agrícola.

La vermicompostaje, por su parte, emplea lombrices para acelerar la degradación de los residuos orgánicos y producir humus con alta disponibilidad de nutrientes, mejorando las propiedades físicas y químicas del suelo [19].

En contraste, la digestión anaerobia es un proceso biológico que ocurre en ausencia de oxígeno y permite el aprovechamiento energético de los residuos mediante la producción de biogás, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono. Además, genera un subproducto denominado digestato, el cual conserva una fracción importante de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, con potencial de aplicación agrícola [2].

Estas estrategias representan alternativas tecnológicas viables para el manejo integral de los residuos sólidos orgánicos, al permitir tanto la recuperación de energía como el reciclaje de nutrientes, reduciendo la carga ambiental asociada a su disposición final.

3.2 Biomasa

La biomasa se define como el conjunto de materiales de origen biológico, renovables y biodegradables, que pueden ser utilizados como fuente de energía o materia prima para distintos procesos de transformación. Incluye residuos agrícolas, forestales, pecuarios, urbanos y agroindustriales, los cuales presentan un alto potencial para la producción de energía renovable y biofertilizantes [20].

En el contexto del manejo de residuos sólidos orgánicos, la biomasa constituye el sustrato principal para procesos como el compostaje y la digestión anaerobia, permitiendo el aprovechamiento energético y la recuperación de nutrientes mediante procesos biológicos controlados [18].

La biomasa puede clasificarse de acuerdo con su origen y su contenido de humedad. De manera general, se distinguen cuatro grandes grupos: biomasa natural, biomasa residual, biomasa seca y biomasa húmeda. Cada una de estas categorías presenta características particulares que determinan su potencial de aprovechamiento energético y su adecuación para distintos procesos de conversión [20]. En la Ilustración 2. Se presenta un esquema en donde se puede observar la clasificación de la biomasa.

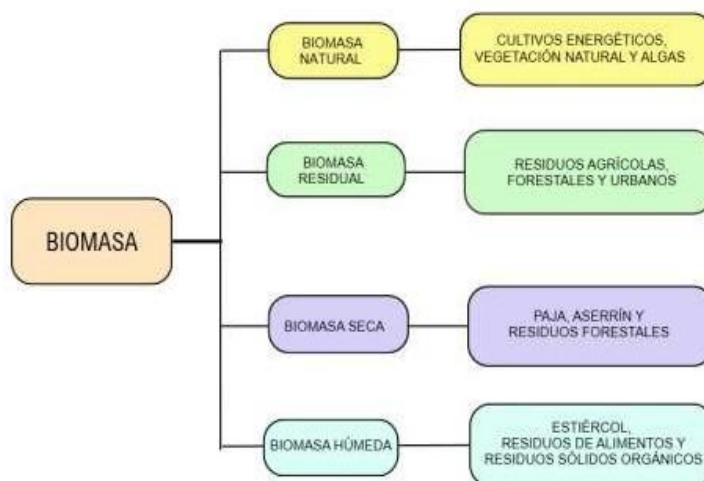


Ilustración 2. Clasificación general de la biomasa según su origen y contenido de humedad.

Fuente elaboración propia con base en FAO [18] y Kothari [20].

3.3 Biogás

El biogás es un producto gaseoso generado mediante la descomposición anaerobia de materia orgánica en ausencia de oxígeno. Está compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), además de pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno (H_2S), vapor de agua y otros gases en proporciones menores [20] Su producción se basa en la actividad de microorganismos que degradan residuos orgánicos como estiércoles, residuos agrícolas y residuos sólidos urbanos.

Debido a su contenido energético, el biogás puede emplearse como combustible para la generación de calor y electricidad mediante motores de combustión interna o turbinas. Asimismo, puede someterse a procesos de purificación para obtener biometano, el cual puede utilizarse como combustible vehicular o inyectarse en redes de gas natural [21].

3.3.1 Biogás en el ámbito mundial

A nivel mundial, el biogás es considerado una tecnología estratégica dentro de la bioenergía debido a su capacidad para valorizar residuos orgánicos y contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero [21].

La producción global de biogás y biometano presenta una distribución heterogénea entre regiones, con mayor desarrollo en Europa, América del Norte y algunas regiones de Asia. El potencial técnico para la generación de biogás se concentra principalmente en regiones con alta disponibilidad de residuos agrícolas, pecuarios y municipales, lo cual explica las diferencias en su grado de implementación entre países [22].

Como se muestra en la Ilustración 3. El potencial técnico de producción de biogás y biometano se distribuye de manera heterogénea a nivel mundial, concentrándose principalmente en regiones con alta disponibilidad de residuos agrícolas, pecuarios y urbanos, como Europa, América del Norte y Asia.

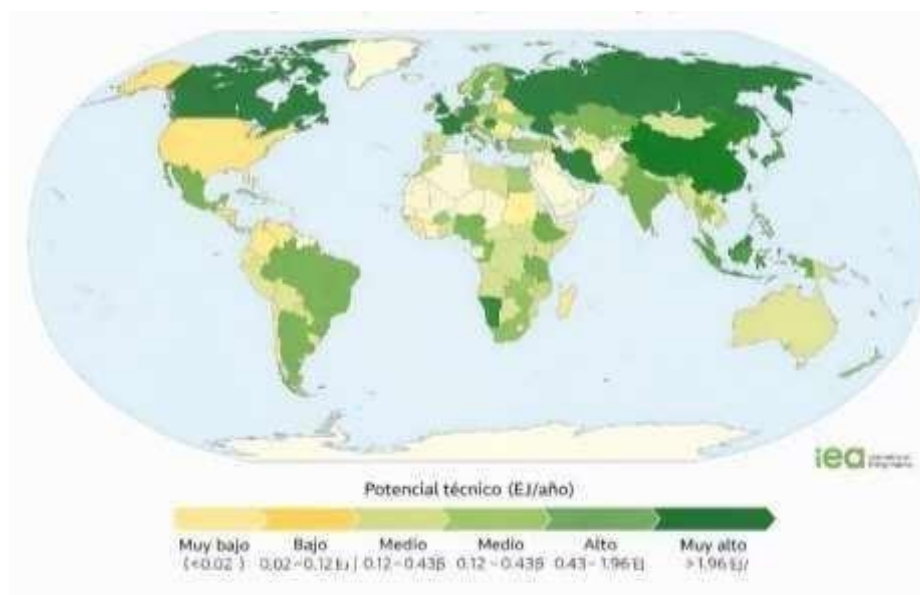


Ilustración 3. Distribución global del potencial del técnico de producción de biogás y biometano.

Fuente: IEA [22].

3.3.2 El Biogás en México

En México, la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos representa una oportunidad significativa para su valorización mediante procesos biológicos como la digestión anaerobia, reduciendo el volumen destinado a disposición final y favoreciendo el manejo integral de residuos [17].

De acuerdo con la Secretaría de Energía, el biogás forma parte del potencial nacional de energías renovables, especialmente en sectores agropecuarios y de manejo de residuos, donde existe disponibilidad de materia orgánica susceptible de aprovechamiento energético. En estados con alta actividad agrícola y pecuaria se identifica un mayor potencial para la generación de biogás, lo que evidencia la viabilidad técnica del aprovechamiento energético de residuos orgánicos en el país [23].

Como se observa en la Ilustración 4. Las regiones con mayor potencial se concentran en estados con alta actividad agropecuaria y generación de residuos orgánicos, lo que evidencia la viabilidad técnica del aprovechamiento del biogás como fuente de energía renovable en el país.



Ilustración 4. Distribución del potencial técnico de biogás en México por entidad federativa.

Fuente: SENER [23]

3.3.3 Producción de biogás mediante digestión anaerobia

La producción de biogás mediante digestión anaerobia constituye una de las principales tecnologías para el aprovechamiento energético de residuos orgánicos. Este proceso biológico ocurre en ausencia de oxígeno y permite transformar la fracción orgánica biodegradable en biogás y digestato, contribuyendo al tratamiento de residuos y a la generación de energía renovable. El biogás producido está compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), y puede utilizarse para la generación de energía térmica y eléctrica, o bien purificarse para obtener biometano con aplicaciones energéticas específicas [24].

Además, el subproducto del proceso, conocido como digestato, conserva una fracción significativa de nutrientes que pueden reincorporarse al suelo como biofertilizante, favoreciendo el reciclaje de nutrientes dentro de esquemas de bioeconomía y aprovechamiento sostenible de los recursos [25].

3.4. Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico en el que una comunidad microbiana degrada materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando biogás y digestato como productos finales. Este proceso ha sido ampliamente implementado en biodigestores para el tratamiento de residuos orgánicos y la producción de energía renovable. Durante la DA, compuestos orgánicos complejos como carbohidratos, proteínas y lípidos son transformados de manera secuencial por distintos grupos microbianos hasta la formación de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) [26]

Además de su contribución energética, este proceso permite estabilizar la materia orgánica y favorecer el reciclaje de nutrientes mediante el aprovechamiento del digestato como biofertilizante [25].

En la Tabla 2 se presentan las principales etapas microbiológicas de la digestión anaerobia y los grupos de microorganismos involucrados en cada fase del proceso.

Tabla 2. Clasificación de los microorganismos del proceso de digestión anaerobia

Etapas del proceso	Tipo de microorganismos	Función principal	Ejemplo
Hidrólisis	Bacterias hidrolíticas	Descomponen polímeros complejos (proteínas, carbohidratos y lípidos) en compuestos simples	<i>Clostridium</i> , <i>Bacteroides</i> , <i>Bacillus</i>
Acidogénesis	Bacterias acidogénicas	Transforman los compuestos simples en ácidos grasos volátiles, alcoholes, H_2 y CO_2	<i>Lactobacillus</i> , <i>Streptococcus</i> , <i>Enterobacter</i>
Acetogénesis	Bacterias acetogénicas	Convierten los ácidos grasos y alcoholes en ácido acético, H_2 y CO_2	<i>Syntrophomonas</i> , <i>Syntrophobacter</i>
Metanogénesis	Arqueas metanogénicas	Producen metano (CH_4) a partir de ácido acético, H_2 y CO_2	<i>Methanobacterium</i> , <i>Methanosarcina</i> , <i>Methanosaeta</i>

Fuente: Elaboración propia con base en FAO [25].

3.4.1 Condiciones del proceso anaerobio

El correcto funcionamiento de la digestión anaerobia depende de condiciones fisicoquímicas y biológicas que deben mantenerse dentro de rangos adecuados para garantizar la actividad óptima de los microorganismos responsables de la producción de biogás [27].

Entre los principales factores que influyen en el proceso se encuentran la temperatura, el pH, la relación carbono-nitrógeno (C/N), la humedad y el tiempo de retención hidráulica (TRH).

La temperatura es uno de los parámetros más determinantes, ya que condiciona la velocidad de crecimiento microbiano y la estabilidad del sistema. La digestión anaerobia puede desarrollarse en rangos psicrófilos ($<25\text{ }^{\circ}\text{C}$), mesófilos ($30\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$) y termófilos ($50\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$), siendo el rango mesófilo el más utilizado por su estabilidad operativa. El pH debe mantenerse cercano a la neutralidad ($6.5\text{--}7.5$) para favorecer el desarrollo de bacterias metanogénicas. Desviaciones importantes pueden provocar acumulación de ácidos grasos volátiles y afectar la producción de metano [4].

Asimismo, la relación carbono-nitrógeno (C/N) constituye un parámetro clave para el equilibrio metabólico del sistema, recomendándose valores aproximados entre 20:1 y 30:1 para evitar inhibiciones por amoníaco o deficiencias nutricionales [20].

3.4.2 Etapas de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia se desarrolla a través de cuatro etapas sucesivas e interdependientes:

3.4.2.1 Hidrólisis

En esta etapa inicial, los compuestos orgánicos complejos como carbohidratos, proteínas y lípidos son degradados en moléculas más simples mediante la acción de enzimas extracelulares [27].

3.4.2.2 Acidogénesis

Los productos de la hidrólisis son transformados en ácidos grasos volátiles (AGV), alcoholes, hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2), generando una disminución del pH debido a la acumulación de ácidos orgánicos [27].

3.4.2.3 Acetogénesis

Durante esta fase, los compuestos intermedios son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, los cuales sirven como sustrato para las bacterias metanogénicas [26].

3.4.2.4 Metanogénesis

En la etapa final, las arqueas metanogénicas transforman el ácido acético y el hidrógeno en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), constituyendo el biogás producido [26].

Con la finalidad de facilitar la comprensión del proceso de digestión anaerobia y la interacción entre sus diferentes fases, a continuación, en la Ilustración 5. Se presenta de manera esquemática las principales etapas que conforman este proceso biológico. El esquema permite visualizar de forma clara la relación entre cada fase, los productos intermedios generados y el resultado final del proceso.

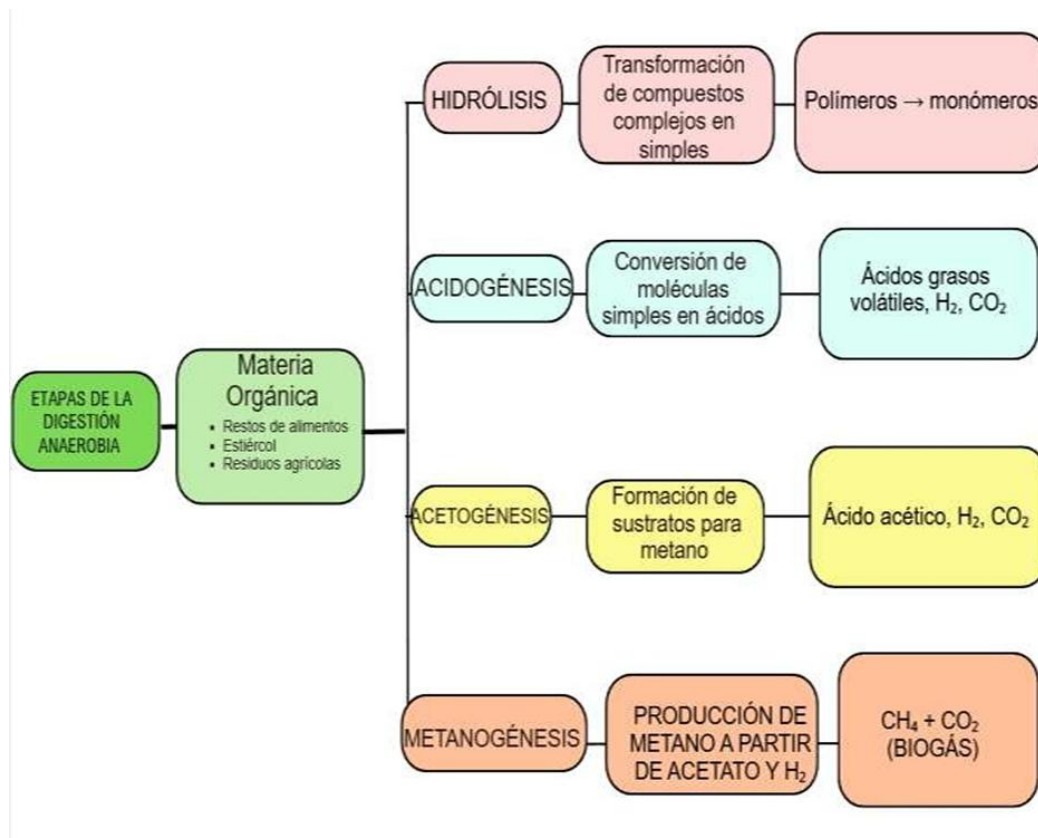


Ilustración 5. Etapas de la digestión anaerobia.

Fuente: Elaboración propia con base en Appels [26].

3.5 Biodigestores

Un biodigestor es un sistema cerrado y hermético diseñado para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia, mediante el cual la materia orgánica es degradada por microorganismos en ausencia de oxígeno, generando biogás como fuente de energía renovable y un subproducto rico en nutrientes conocido como digestato o biofertilizante [18].

Los biodigestores permiten el aprovechamiento energético y agrícola de los residuos sólidos orgánicos, reduciendo su volumen, minimizando impactos ambientales y contribuyendo a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero. Además, representan una tecnología clave dentro de los esquemas de economía circular, ya que promueven la valorización de los residuos en lugar de su disposición final [24].

Su aplicación se ha extendido tanto en zonas rurales como urbanas, en actividades agropecuarias, industriales e institucionales, debido a su versatilidad y beneficios ambientales y económicos [25].

3.5.1 Componentes de un biodigestor

Un biodigestor convencional está compuesto por:

Cámara de digestión: recipiente hermético donde ocurre la degradación anaerobia.

Sistema de alimentación: entrada para el sustrato orgánico.

Sistema de salida: extracción de biofertilizante líquido.

Sistema de captación de biogás: tuberías y válvulas para almacenamiento o conducción.

Dispositivos de control: monitoreo de temperatura, presión y pH en sistemas tecnificados.

La eficiencia del sistema depende del diseño estructural y del adecuado equilibrio entre carga orgánica y volumen del reactor [27].

3.5.2 Tipos de biodigestores

Los biodigestores pueden clasificarse según su diseño estructural y modo de operación.

Domo fijo: Estructura rígida subterránea, común en zonas rurales. Presenta bajo costo de mantenimiento y larga vida útil.

Campana flotante: Cuenta con una campana móvil que almacena el biogás. Permite visualizar la producción, aunque requiere mayor mantenimiento.

Flujo continuo: Opera con alimentación constante y descarga simultánea de digestato, manteniendo estabilidad operativa.

Biodigestor tubular o de bolsa: Es una alternativa económica, fácil de instalar y adecuada para pequeñas cargas orgánicas en zonas rurales y proyectos piloto [20].

En la Tabla 3. se presenta una clasificación general de los principales tipos de biodigestores utilizados para el aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos (RSO), considerando sus características, ventajas, desventajas y aplicaciones más comunes.

Tabla 3. Tipos de biodigestores más comunes

Tipo de biodigestor	Descripción	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
DOMO FIJO	Estructura rígida de concreto donde el gas se acumula en la parte superior	Bajo costo, durable	No permite ver volumen de gas	Zonas rurales
CAMPANA FLOTANTE	Depósito móvil que se eleva con el biogás	Visualización directa del gas	Corrosión, mayor mantenimiento	Pequeña escala
TUBULAR O BOLSA	Plástico flexible	Económico, fácil instalación	Menor durabilidad	Proyectos piloto
FLUJO CONTINUO	Alimentación y descarga simultánea	Producción constante	Mayor costo	Mediana y gran escala

Elaboración propia con base en Kothari [20]

3.5.3 Productos de los biodigestores

El proceso de digestión anaerobia da lugar principalmente a tres productos: el biogás, el biofertilizante líquido conocido como biol y el biofertilizante sólido denominado digestato. Estos subproductos representan un aprovechamiento integral de los residuos sólidos orgánicos, alineado con los principios de la economía circular y la valorización de residuos. El biogás es una mezcla gaseosa compuesta principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), con pequeñas proporciones de otros gases como sulfuro de hidrógeno (H_2S) y vapor de agua. Su principal interés radica en su capacidad para ser utilizado como fuente de energía renovable, ya sea para la generación de calor, electricidad o como biometano tras su purificación [21].

Por otro lado, el biol, también conocido como digestato líquido, es un efluente rico en nutrientes minerales como nitrógeno, fósforo y potasio, además de contener microorganismos benéficos y compuestos orgánicos solubles. Este producto se utiliza ampliamente como biofertilizante foliar o para riego agrícola, ya que mejora la fertilidad del suelo, estimula el crecimiento vegetal y reduce la necesidad de fertilizantes químicos [22].

El digestato sólido, resultado de la fracción sólida del proceso de digestión anaerobia, constituye otro subproducto de alto valor agronómico. Este material contiene materia orgánica estabilizada, nutrientes y microorganismos, lo que lo convierte en un mejorador de suelo capaz de incrementar la capacidad de retención de agua, mejorar la estructura del suelo y favorecer la actividad biológica edáfica [25] diferencia de los residuos orgánicos sin tratar, el digestato presenta una mayor estabilidad, menor presencia de patógenos y olores, lo que permite su uso seguro en actividades agrícolas.

3.6 *Marco normativo para la implementación de biodigestores en el ámbito educativo y urbano*

La implementación de biodigestores en instituciones educativas y entornos urbanos debe enmarcarse dentro del ordenamiento jurídico y las normas técnicas nacionales que regulan la protección ambiental, la gestión de residuos, la calidad de descargas y

las emisiones atmosféricas. A continuación, se resumen los instrumentos legales y normas aplicables y su relevancia para proyectos de digestión anaerobia en el contexto educativo.

3.6.1 Leyes generales y políticas nacionales

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA).

Establece los principios generales de protección ambiental, prevención de la contaminación y responsabilidad por los daños al ambiente; sienta la base para regulaciones sectoriales sobre manejo de residuos y emisiones. Su marco normativo obliga a autoridades e instalaciones a evitar impactos ambientales y a cumplir permisos y medidas de mitigación [10].

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR).

Regula la prevención, manejo, valorización y disposición final de residuos sólidos; impone obligaciones de separación, manejo diferenciado de fracciones (incluida la fracción orgánica), y fomenta acciones de valorización (compostaje, digestión anaerobia) y responsabilidad de generadores [11].

Ley de Planeación y Transición Energética (o Ley de Transición Energética / instrumentos equivalentes).

Promueve el aprovechamiento de energías renovables y establece metas y lineamientos para el desarrollo de fuentes alternativas como el biogás, que integran proyectos de generación distribuida y bioenergía. Esta ley y su prospectiva impulsan la incorporación del biogás en la matriz energética y habilitan incentivos y marcos para su regulación [12].

3.6.2 Normas oficiales mexicanas (NOM) y requisitos técnicos aplicables

NOM-083-SEMARNAT-2003 (especificaciones para selección de sitio, diseño, construcción, operación y monitoreo de sitios de disposición final): aunque se orienta a rellenos/disposición, contiene criterios relevantes sobre manejo ambiental de residuos y selección de sitio que deben considerarse al diseñar esquemas de valorización y sistemas complementarios de tratamiento [13].

NOM-001-SEMARNAT-2021 (límites permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales): aplica cuando los efluentes líquidos (por ejemplo, lixiviados o

fracciones líquidas del digestato o del biol puedan descargarse en cuerpos receptores o en sistemas de tratamiento; el digestato líquido destinado a riego o su disposición debe cumplir límites y requisitos de vertido/permisos [14].

NOM-044-SEMARNAT-2017 (límites máximos permisibles de emisión de motores que usan combustibles alternativos): relevante si el biogás se utilizará en motores para generación eléctrica o en vehículos; los motores o generadores montados en sitio deben cumplir normas de emisiones para proteger la calidad del aire [15].

4. Planteamiento del problema

En el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan se generan mensualmente alrededor de 29 kg de residuos sólidos orgánicos, principalmente por actividades como el consumo de alimentos en cafeterías y áreas comunes, la preparación de alimentos, el mantenimiento de áreas verdes, y el manejo de residuos biodegradables provenientes de oficinas y laboratorios. Estos residuos representan una fuente potencial para la obtención de productos de valor agregado, como biogás y biofertilizantes, los cuales podrían ser aprovechados dentro de la propia institución bajo un enfoque de economía circular.

Actualmente los residuos sólidos orgánicos generados en el TESCH no cuentan con un sistema específico que permita su aprovechamiento mediante procesos de valorización, como la digestión anaerobia. La falta de mecanismos formales para la separación y el aprovechamiento de los residuos orgánicos desde su origen dificulta su correcta gestión y reduce su viabilidad para ser utilizados en procesos de transformación, como la producción de biogás y biofertilizantes. Esta situación evidencia la necesidad de fortalecer las estrategias institucionales relacionadas con la gestión de residuos sólidos orgánicos, así como de promover acciones que faciliten su aprovechamiento ambiental y energético.

De manera complementaria, el nivel de conocimiento de la comunidad educativa respecto al manejo, separación y aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos influye directamente en la efectividad de cualquier propuesta de gestión. En este sentido, el nivel de conocimiento de la comunidad educativa respecto al manejo y aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos constituye un factor determinante para la efectividad de cualquier estrategia institucional orientada a su valorización. Ante esta situación, se evidencia la necesidad de implementar un sistema de digestión anaerobia que permita el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en el TESCH, acompañado de un manual técnico que oriente su operación y mantenimiento, con el propósito de fortalecer la gestión sostenible de estos residuos dentro de la institución.

5. Hipótesis

Se espera que más del 70 % de la comunidad educativa del Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan posea conocimientos básicos sobre el manejo de los residuos sólidos orgánicos, lo que permitirá establecer las condiciones técnicas y operativas necesarias para la implementación de un sistema de digestión anaerobia orientado al aprovechamiento de dichos residuos y la producción de biofertilizante.

6. Objetivos

6.1 General

Implementar un sistema de digestión anaerobia a escala piloto para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, incluyendo su caracterización, análisis del biol y elaboración de un manual técnico.

6.2 Específicos

1. Caracterizar los residuos sólidos orgánicos generados en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan para la implementación de un sistema de digestión anaerobia a escala piloto y a escala mayor
2. Elaborar y aplicar una encuesta dirigida a la comunidad educativa del TESCH para evaluar el nivel de conocimiento sobre el manejo y aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos.
3. Analizar la relación de carbono-nitrógeno (C/N) del biol obtenido con un almacenamiento de cinco y ocho meses, complementando con un análisis de microscopía electrónica de barrido para su uso como mejorador de suelo.
4. Elaborar un manual técnico que describa la implementación, operación y mantenimiento del sistema de digestión anaerobia, como herramienta de apoyo para su futura aplicación en el TESCH.

7. Metodología

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto, combinando métodos cualitativos y cuantitativos, con el objetivo de implementar y evaluar un biodigestor a escala piloto para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos (RSO) generados en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan (TESCH).

La metodología se estructuró en cuatro etapas principales: recolección, cuantificación y caracterización de los residuos sólidos orgánicos, así como la implementación del biodigestor a escala menor con un volumen de 20 L y a escala mayor con un volumen de 200 L. La aplicación de una encuesta a la comunidad educativa del TESCH; determinación de la relación carbono-nitrógeno (C/N) y análisis mediante microscopía electrónica de barrido; elaboración de un manual técnico de instalación, operación y mantenimiento del biodigestor; y. A continuación, se describen detalladamente las etapas del trabajo.

7.1 *Etapas 1. Recolección, cuantificación y caracterización de los RSO*

El manejo de los residuos sólidos orgánicos provenientes de la cafetería del Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, se llevó a cabo mediante un procedimiento sistemático que incluyó las etapas de recolección, separación, caracterización, cuantificación, almacenamiento y pretratamiento, con el propósito de evaluar su potencial de aprovechamiento mediante el proceso de digestión anaerobia.

7.1.1 Recolección, separación y caracterización de los RSO

Una vez recolectados, los residuos fueron sometidos a un proceso de separación manual con el fin de eliminar materiales inorgánicos no biodegradables, como plásticos, papel, huesos y cartón. Posteriormente, se realizó la caracterización física de los residuos, clasificándolos de acuerdo con su tipo y composición, lo que permitió identificar los principales componentes orgánicos y evaluar su viabilidad como sustrato para el sistema de biodigestión.

7.1.2 Cuantificación y preparación física de los RSO

Los residuos previamente separados fueron cuantificados mediante el uso de una báscula digital, registrando su peso en kilogramos, para determinar la cantidad de generación de residuos orgánicos. Posteriormente, los residuos fueron sometidos a un proceso de trituración manual, con el objetivo de reducir el tamaño de partícula y favorecer la acción de los microorganismos durante su degradación biológica.

7.1.3 Almacenamiento

Los residuos triturados fueron almacenados en recipientes herméticos, con el fin de evitar la contaminación externa y la pérdida de sus propiedades fisicoquímicas. Este almacenamiento permitió conservar los residuos en condiciones adecuadas hasta el momento de su utilización como sustrato en el biodigestor.

7.1.4 Proceso previo a la alimentación del biodigestor

Previo a su incorporación al biodigestor, los residuos almacenados fueron sometidos a un proceso de remojo con agua durante un periodo de 2 a 5 horas. Dicho proceso tuvo como finalidad facilitar la degradación de la materia orgánica, así como facilitar el proceso manual por el que fueron sometidos estos residuos. Posteriormente, la mezcla fue introducida en el biodigestor, dando inicio al proceso de digestión anaerobia.

7.1.1.1 Etapa. 1.1. Implementación de un sistema de digestión anaerobia a escala menor
En esta etapa se implementó un sistema de digestión anaerobia a escala menor con capacidad de 20 L, con el propósito de evaluar el comportamiento del proceso en condiciones controladas y determinar la viabilidad del aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos como sustrato.

El biodigestor fue construido utilizando un recipiente plástico con capacidad de 20 L, el cual fue acondicionado para operar en condiciones anaerobias, asegurando la hermeticidad del sistema y evitando la entrada de oxígeno.

El prototipo fue construido con los siguientes componentes:

- Entrada de alimentación: Ubicada en la parte superior del biodigestor, destinada a la incorporación del sustrato orgánico previamente sometido a pretratamiento.
- Salida de biogás: Instalada en la parte superior del recipiente, permitiendo la conducción y recolección del gas generado durante la operación del sistema.

- Salidas de biofertilizante: Se instalaron dos conexiones laterales para la extracción de los subproductos obtenidos, correspondientes a la fracción líquida (biol). Posteriormente, se realizó la carga inicial del biodigestor mediante la incorporación de una mezcla compuesta por 2 Kg. de excretas de gallinaza, 2 Kg residuos sólidos orgánicos y 2 L. agua, con el fin de proporcionar los nutrientes necesarios para el desarrollo de los microorganismos anaerobios.

Las excretas de gallinaza fueron obtenidas del Rancho Coatepec, los residuos sólidos orgánicos de la cafetería del Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, y el agua utilizada correspondió a agua de lluvia. Esta mezcla fue introducida en el biodigestor a través de la entrada de alimentación, asegurando el cierre hermético del sistema para evitar la entrada de oxígeno y garantizar condiciones anaerobias. Una vez realizada la carga inicial, el biodigestor inició su operación, manteniéndose en un periodo de retención hidráulica (TRH) de 30 días, con el fin de favorecer la adaptación y el desarrollo de los microorganismos anaerobios responsables del proceso de digestión.

Después del procedimiento antes mencionado, se llevaron a cabo alimentaciones periódicas utilizando residuos sólidos orgánicos mezclados con agua, con el propósito de mantener la actividad biológica dentro del biodigestor y favorecer la degradación continua de la materia orgánica. Durante el periodo de operación, se incorporaron 1 kg de residuos sólidos orgánicos y 1 L de agua en cada evento de alimentación, de acuerdo con la capacidad del biodigestor y las condiciones de operación establecidas. Estas alimentaciones permitieron evaluar el comportamiento del sistema y su capacidad para degradar la materia orgánica mediante el proceso de digestión anaerobia.

7.1.1.2 Etapa. 1.2. Implementación de un sistema de digestión anaerobia a escala mayor Posteriormente, se implementó un sistema de digestión anaerobia a escala mayor utilizando un biodigestor con capacidad de 200 L, con el objetivo de evaluar el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan como sustrato para la producción de biogás y biofertilizante (biol). La carga inicial del biodigestor se realizó mediante la incorporación de una mezcla compuesta por 25 kg de excretas de vacuno, 5 kg de residuos sólidos

orgánicos (RSO) provenientes de la cafetería del TESCH y 5 L de agua de lluvia, con el fin de proporcionar las condiciones adecuadas para el desarrollo de los microorganismos anaerobios responsables del proceso de digestión. Una vez introducido el sustrato, el biodigestor fue sellado herméticamente para garantizar condiciones anaerobias y evitar la entrada de oxígeno al sistema. Posteriormente, se estableció un periodo de retención hidráulica (TRH), durante el cual no se realizaron alimentaciones, con el propósito de permitir la adaptación de los microorganismos y el inicio del proceso de degradación de la materia orgánica. Después de este periodo, se llevaron a cabo alimentaciones periódicas mediante la incorporación de residuos sólidos orgánicos y agua, en proporciones previamente establecidas, con el objetivo de mantener la actividad microbiológica dentro del biodigestor y favorecer la continuidad del proceso de digestión anaerobia. Durante cada evento de alimentación, se registraron las cantidades de sustrato incorporadas, así como el volumen total añadido al sistema. La implementación del biodigestor a escala mayor permitió evaluar la viabilidad del aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en la institución mediante digestión anaerobia, contribuyendo al manejo adecuado de los residuos y a la generación de subproductos con potencial de aprovechamiento agrícola y energético.

7.2 Etapa 2. Aplicación de encuesta a la comunidad del TESCH

7.2.1 Población y muestra

Se elaboró y aplicó una encuesta dirigida a estudiantes, docentes y personal administrativo del Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan (TESCH), con el propósito de evaluar los conocimientos, actitudes y prácticas relacionadas con el manejo de residuos sólidos orgánicos (RSO). Se obtuvieron más de 100 respuestas, constituyendo una muestra diversa y representativa de la comunidad educativa. El instrumento estuvo conformado por 13 variables estructuradas de opción múltiple.

7.2.2 Elaboración y aplicación del instrumento

El cuestionario fue diseñado en la plataforma Google Forms y distribuido mediante WhatsApp institucional, facilitando el acceso y promoviendo una amplia participación. La aplicación se realizó dentro de las instalaciones del TESCH. Las variables

recopiladas permitieron analizar el nivel de conocimiento sobre la separación y gestión de residuos, así como la disposición de la comunidad para participar en estrategias de aprovechamiento de la fracción orgánica.

7.2.3 Análisis estadístico

El procesamiento de los datos se realizó mediante los programas SPSS y Microsoft Excel. Se emplearon técnicas de estadística descriptiva e inferencial para la interpretación de resultados.

7.2.3.1 Análisis de conglomerados (Clúster)

Se aplicó un análisis jerárquico de conglomerados para identificar grupos de participantes con patrones similares en conocimientos, actitudes y prácticas respecto al manejo de RSO.

El método de agrupación utilizado fue el Método de Ward, el cual minimiza la varianza intragrupo durante el proceso de fusión de conglomerados. Como medida de distancia se empleó la distancia euclídea al cuadrado, adecuada para variables cuantificadas y comúnmente utilizada en análisis de clúster jerárquico.

A partir del dendrograma obtenido se identificaron tres niveles de conocimiento:

Nivel bajo

Nivel intermedio

Nivel alto

La selección del número de conglomerados se determinó con base en la interpretación visual del dendrograma y el criterio de incremento significativo en la distancia de fusión.

7.2.3.2 Prueba Chi-cuadrada de independencia

Para analizar la relación entre variables categóricas (por ejemplo, tipo de usuario: estudiante, docente o administrativo; y nivel de conocimiento), se aplicó la prueba Chi-cuadrada (χ^2) de independencia.

Se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Se calcularon los valores del estadístico χ^2 y su correspondiente valor p, lo que permitió determinar si existía una asociación estadísticamente significativa entre las variables analizadas.

La interpretación de los resultados se realizó de la siguiente manera:

- Si $p < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula (existe asociación significativa).
- Si $p \geq 0.05$, no se rechaza la hipótesis nula (no existe asociación significativa).

7.3 *Etapas 3: Relación Carbono-Nitrógeno*

Se realizó un análisis identificando la relación C/N para determinar el contenido total de Carbono, las muestras a analizar de biofertilizante líquido (biol) obtenidas a partir de biodigestores alimentados con boñiga con un tiempo de operación de 5 meses y gallinaza con un tiempo de operación de 8 meses, con el objetivo de evaluar sus características fisicoquímicas y determinar su calidad y potencial como mejorador de suelo.

El análisis se realizó en las instalaciones de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa, con apoyo del Laboratorio de BIOPROCESOS bajo la dirección del Mtro. Sergio Hernández Jiménez.

7.3.1 Preparación de muestras

La recolecta de muestras fue directamente de los biodigestores y transportadas en recipientes limpios y herméticos hasta el laboratorio. Para cada análisis se utilizó aproximadamente 250 mL de solución, generando tres repeticiones de muestras el análisis realizado fue por medio de TOC, para la identificación de Carbono total y Nitrógeno total

Previo al proceso de centrifugación, las muestras fueron pesadas con el fin de asegurar condiciones homogéneas durante el análisis. En todos los casos se trabajó con un peso constante de 58.7 gramos por muestra, garantizando que todas presentaran el mismo peso para evitar errores asociados a diferencias de masa durante la separación de fases.

Las muestras se colocaron en una centrifugadora con capacidad para cuatro muestras simultáneas, destinando tres muestras al análisis y una muestra control con agua.

La centrifugación se llevó a cabo durante 10 minutos a una velocidad de 10,000 revoluciones por minuto (rpm), con el objetivo de separar la fracción sólida del líquido y obtener un sobrenadante más limpio para su posterior análisis.

7.3.2 Determinación de parámetros

Posteriormente, se realizó una dilución por triplicado utilizando 10mL de muestra y 90mL de agua destilada, con el fin de obtener soluciones homogéneas y adecuadas para su análisis instrumental. Para la determinación de Carbono Total (TC), Carbono Inorgánico (IC) y Nitrógeno Total (TN) se utilizó un analizador de Carbono Orgánico Total (TOC), el cual permite cuantificar de manera precisa el contenido de carbono y nitrógeno presentes en muestras líquidas.

Este equipo opera mediante la oxidación térmica o química de la muestra, seguida de la detección de los gases generados, lo que permitió obtener resultados confiables sobre la composición nutrimental del biol.

7.3.3 Etapa 3.1 Análisis de microscopia electrónica de barrido

Para el análisis microscópico, se utilizaron muestras de biol obtenidas a partir de la operación de los biodigestores alimentados por excretas de vacuno y gallinaza, las cuales presentaban un tiempo de maduración de cinco y ocho meses, respectivamente. Las muestras se encontraban en estado líquido, por lo que fue necesario realizar un proceso de deshidratación para su posterior análisis.

Se tomó una muestra de biol de origen vacuno con un peso de 84.73 g, mientras que la muestra de gallinaza fue recolectada en condiciones similares. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en una estufa de secado a una temperatura controlada de 45 °C, con el fin de eliminar el contenido de humedad y facilitar su manejo. El proceso de secado se llevó a cabo durante un periodo comprendido del 29 de septiembre al 23 de octubre, con una frecuencia de cuatro días por semana, en un horario de 9:00 a 15:00 horas, hasta obtener una consistencia sólida.

Una vez finalizado el proceso de secado, las muestras no presentaron una textura completamente homogénea, por lo que se realizó un proceso de trituración manual utilizando un mortero con pistilo, con el objetivo de reducir el tamaño de partícula y obtener una muestra más uniforme.

Finalmente, las muestras sólidas fueron almacenadas en recipientes herméticos para su posterior análisis mediante microscopía, con el propósito de observar las características estructurales del material resultante del proceso de digestión anaerobia.

7.4 Etapa 4: Elaboración de un manual de implementación, manejo y mantenimiento del sistema de digestión anaerobia.

Como última etapa, se elaboró un manual de instalación, manejo y mantenimiento del sistema de digestión anaerobia, dirigido a la comunidad educativa del TESCH. El manual se diseñó como una herramienta práctica y accesible, que describe de manera general los procedimientos necesarios para la correcta instalación del biodigestor, desde el manejo y gestión de residuos orgánicos, su operación adecuada y las actividades básicas de mantenimiento preventivo.

El objetivo de este manual es facilitar el uso del sistema, promover su correcta operación y contribuir a la difusión de prácticas sustentables dentro de la institución, fortaleciendo la gestión integral de los Residuos Sólidos Orgánicos y el aprovechamiento de sus subproductos.

8. Resultados y discusión

8.1. *Etapas 1. Recolección, cuantificación y caracterización de los RSO*

Durante el proceso de caracterización de los residuos sólidos orgánicos generados en la cafetería del Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, se identificó la presencia de diversos residuos de origen vegetal, principalmente jícama, zanahoria, lechuga, jitomate, cilantro, tomate, papa, calabaza, uvas, cáscara de plátano y manzana. Estos residuos corresponden principalmente a restos de frutas, verduras, hortalizas y tubérculos, los cuales presentan un alto contenido de materia orgánica biodegradable.

Estos residuos contienen carbohidratos simples y complejos, como glucosa, fructosa, almidón y celulosa, los cuales son fundamentales en el proceso de digestión anaerobia, ya que sirven como fuente de energía para los microorganismos anaerobios. Los azúcares simples, presentes principalmente en frutas como la uva y la manzana, facilitan una degradación más rápida, mientras que los carbohidratos complejos, como la celulosa presente en verduras como la zanahoria, calabaza y lechuga, presentan una degradación más lenta, favoreciendo la estabilidad del proceso.

La presencia de estos compuestos confirma que los residuos generados en la cafetería del TESCH son adecuados para su aprovechamiento mediante digestión anaerobia, permitiendo la degradación de la materia orgánica y la obtención de subproductos como biol.

En la Tabla 4. Se presentan los principales tipos de residuos orgánicos identificados y su composición en términos de compuestos predominantes y tipo de azúcar.

Tabla 4. Tipos de residuos identificados en la generación del TESCH.

Tipo de residuo	Componente principal	Tipo de azúcar
Frutas	Fructosa	Monosacárido
Verduras	Celulosa	Polisacárido
Tubérculos	Almidón	Polisacárido
Residuos Vegetales	Hemicelulosa	Polisacárido

Elaboración propia.

8.1.1 Generación semanal de RSO en el TESCH

En la Tabla 5. Se presenta la generación semanal de residuos sólidos orgánicos en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan durante el periodo de marzo a noviembre. Se observa una variación en la cantidad de residuos generados, con valores que oscilan entre 3 kg y 8 kg por semana. Las semanas con menor generación coinciden con periodos vacacionales, como en abril y julio, donde la actividad académica disminuye considerablemente. Por otro lado, las semanas con mayor generación corresponden a periodos de clases regulares, en los cuales existe mayor consumo de alimentos en la cafetería. Estos resultados confirman que la generación de residuos sólidos orgánicos está directamente relacionada con la actividad de la comunidad educativa.

Tabla 5. Generación de RSO semanal en el TESCH

Mes	Semana	Días	Kg de RSO
	1	3 al 7	7 kg
	2	10 al 14	6 kg

Marzo	3	17 al 21	5 kg
	4	24 al 28	5 kg
	5	31 al 4	6 kg
Abril	6	7 al 11	6 kg
	7	14 al 18	Vacaciones
	8	21 al 25	
	9	28 al 30	8 kg
Mayo	10	6 al 9	6 kg
	11	12 al 16	7.5 kg
	12	19 al 23	5.3 kg
	13	26 al 30	7 kg
Junio	14	2 al 6	8 kg
	15	9 al 13	6 kg
	16	16 al 20	6.3 kg
	17	23 al 27	7 kg
Julio	18	1 al 4	6 kg
	19	7 al 11	5 kg
	20	14 al 18	Vacaciones
	21	21 al 25	
	22	28 al 31	4 kg

Agosto	23	4 al 8	5 kg
	24	11 al 15	4 kg
	25	18 al 22	3 kg
	26	25 al 29	4 kg
Septiembre	27	1 al 5	7 kg
	28	8 al 12	6.5 kg
	29	15 al 19	6 kg
	30	22 al 26	7. kg
	31	29 al 3	5 kg
Octubre	32	6 al 10	7 kg
	33	13 al 17	6.3 kg
	34	20 al 24	5 kg
	35	27 al 31	6 kg
Noviembre	36	3 al 7	6 kg
	37	10 al 14	6 kg
	38	17 al 21	6 kg
	39	24 al 28	5 kg

Elaboración propia en base al estudio de caracterización de RSO en el TESCH

8.1.2 Generación mensual de RSO en el TESCH

La Ilustración 6. Muestra la generación mensual de residuos sólidos orgánicos (RSO) en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan durante el periodo de marzo a noviembre. Se observa que las barras en color azul oscuro representan los meses con mayor generación de residuos, destacando marzo con un total de 29 kg y septiembre con 28.8 kg. Del mismo modo, el mes de junio, representado en color azul claro, presentó una generación significativa de 27.3 kg, seguido de mayo con 25.8 kg y octubre con 24.3 kg, lo que indica una alta disponibilidad de residuos orgánicos durante estos periodos de actividad académica regular.

Por otro lado, las barras en color gris representan los meses con menor generación de residuos sólidos orgánicos, destacando julio con 15 kg y agosto con 16 kg. Esta disminución coincide con el periodo vacacional, durante el cual la actividad dentro de la institución se reduce considerablemente, disminuyendo la generación de residuos orgánicos. El mes de abril también presentó una generación moderada de 20 kg, lo cual puede atribuirse a una menor actividad académica en comparación con otros meses del periodo escolar. Estos resultados demuestran que la generación de residuos sólidos orgánicos está directamente relacionada con la actividad de la comunidad educativa dentro de la institución. Los meses con mayor actividad académica presentan una mayor generación de residuos, mientras que durante los periodos vacacionales se observa una disminución significativa.

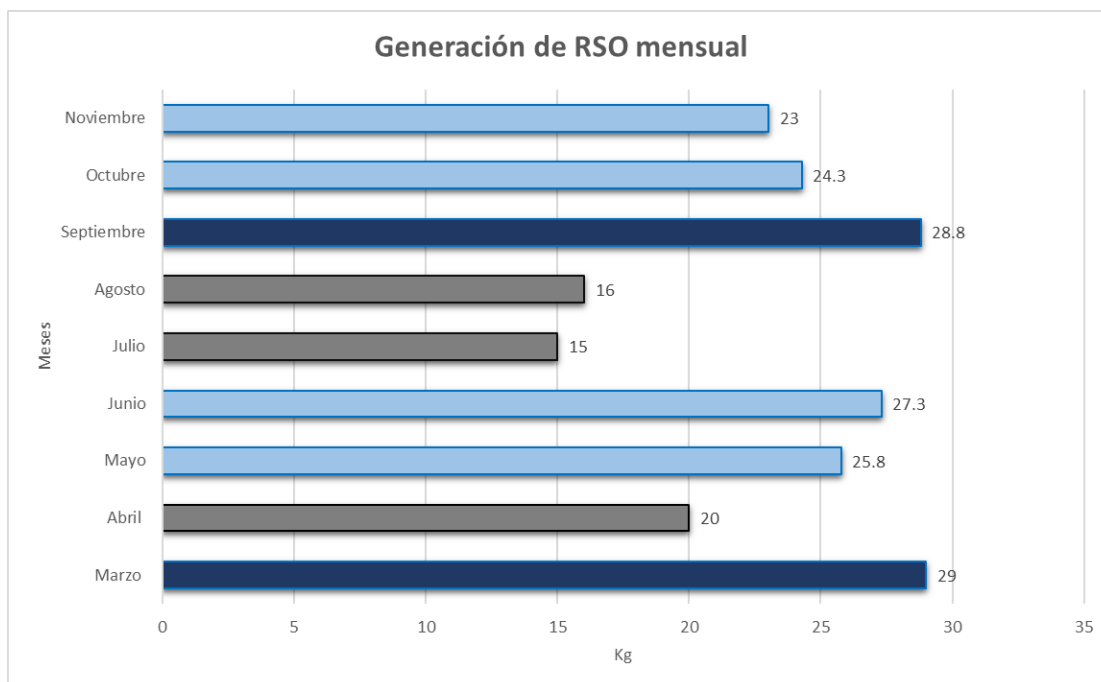


Ilustración 6. Generación mensual de RSO.

Elaboración propia con base en el estudio de generación mensual de RSO en el TESCH

8.1.1.1 Etapa 1.1 Implementación del sistema de digestión anaerobia a escala menor

Se implementó un sistema de digestión anaerobia a escala menor con capacidad de 20 L, utilizando como sustrato residuos sólidos orgánicos generados en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, mezclados con excretas de gallinaza y agua, con el objetivo de evaluar la producción de biogás y la obtención de biofertilizante (biol). El sistema fue operado en condiciones anaerobias durante el periodo de estudio. Sin embargo, debido a limitaciones en la hermeticidad del sistema, la producción de biogás fue baja, lo que influyó en la obtención de menores porcentajes de metano. Esta situación pudo deberse a posibles fugas en el sistema o a la presencia de pequeñas entradas de oxígeno, las cuales afectan la actividad de los microorganismos metanogénicos responsables de la producción de metano.

En la Tabla 6. Se presentan los componentes que se utilizaron en la carga inicial del sistema.

Tabla 6. Componentes de carga Inicial

Mezcla de alimentación		
Componentes	Origen	Cantidad
Excretas de gallinaza	Rancho Coatepec	2 kg
RSO	Cafetería del TESCH	2 kg
Agua	Agua de lluvia	2 L

Elaboración propia

En la Tabla 7. Se presenta el registro de las cargas de alimentación realizadas al sistema de digestión anaerobia durante el periodo experimental, posterior a la carga inicial. Los resultados muestran que el biodigestor operó con un volumen de trabajo de 16 L y recibió alimentación periódica durante 11 semanas.

Se observa que, después de la carga inicial, el sistema permaneció sin alimentación durante las semanas 2 a 5, correspondiente al periodo de tiempo de retención hidráulica (TRH), permitiendo el inicio del proceso de degradación anaerobia. Posteriormente, a partir de la semana 6 y hasta la semana 16, se realizaron cargas de alimentación cada 15 días, consistentes en la adición de 1 kg de residuos sólidos orgánicos y 1 L de agua en cada evento.

Los resultados evidencian que esta alimentación periódica permitió mantener el proceso biológico activo, favoreciendo la degradación progresiva de la materia orgánica. Asimismo, se observó la formación de una fracción líquida correspondiente al biofertilizante (biol), lo que confirma la actividad microbiológica dentro del sistema. La obtención de este subproducto indica que el proceso de digestión anaerobia se llevó a cabo, permitiendo la transformación de los residuos sólidos orgánicos en productos aprovechables.

Tabla 7. Cargas de Alimentación

Semana	Volumen del SDA	Tipo de alimentación	Excretas (kg)	RSO (kg)	Agua (L)	Volumen total de sustrato	Obtención de biol.
1	16 L	Carga Inicial	2 kg	2 kg	2 L	6 kg	Sin obtención
2–5	16 L	Sin alimentación (Periodo de TRH)	0	0	0	0	Sin obtención
6	16 L	Alimentación	0	1 kg	1 kg	2 kg	2 L
8	16 L	Alimentación	0	1 kg	1 kg	2 kg	2 L
10	16 L	Alimentación	0	1 kg	1 kg	2 kg	2 L
12	16 L	Alimentación	0	1 kg	1 kg	2 kg	2 L
14	16 L	Alimentación	0	1 kg	1 kg	2 kg	2 L
16	16 L	Alimentación	0	1 kg	1 kg	2 kg	2 L

Elaboración propia

Por otro lado, las condiciones de temperatura registradas durante el periodo de operación influyeron en el rendimiento del sistema. Se observó que la temperatura interna del biodigestor osciló entre 14.3 °C y 35.1 °C, presentando variaciones significativas y operando principalmente en un rango mesofílico bajo. Estas condiciones no fueron completamente óptimas para el desarrollo de los microorganismos metanogénicos, los cuales presentan una mayor actividad en rangos de temperatura más estables, generalmente entre 30 °C y 37 °C. Las fluctuaciones de temperatura y los valores bajos registrados pudieron limitar la eficiencia del proceso y,

en consecuencia, la producción de metano. No obstante, se observó la degradación de la materia orgánica y la formación de una fracción líquida correspondiente al biofertilizante (biol), el cual se encontraba en proceso de maduración. La obtención de este subproducto confirma que el proceso de digestión anaerobia se llevó a cabo, permitiendo la transformación de los residuos sólidos orgánicos. Estos resultados indican que, a pesar de las limitaciones en la producción de biogás, el sistema permitió el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos y la obtención de biofertilizante, demostrando la viabilidad del proceso de digestión anaerobia como una alternativa para el manejo y valorización de residuos orgánicos dentro de la institución.

8.1.3 Monitoreo de parámetros del biodigestor

Con el fin de evaluar el comportamiento del biodigestor a escala menor durante el proceso de digestión anaerobia, se realizó el monitoreo de parámetros fisicoquímicos como la temperatura interna, temperatura ambiental, humedad ambiental y peso del sistema durante el periodo de operación. Estos parámetros permiten evaluar las condiciones en las que se desarrollan los microorganismos anaerobios responsables de la degradación de la materia orgánica. Los resultados del monitoreo se presentan en la Tabla 8. Se observó que la temperatura interna del biodigestor osciló entre 14.3 °C y 35.1 °C, mientras que la temperatura ambiental presentó valores entre 12.7 °C y 32.0 °C. Estas condiciones corresponden a un rango mesofílico bajo, el cual influye en la actividad microbiológica y en la eficiencia del proceso de digestión anaerobia. A su vez, se observaron los parámetros en las condiciones ambientales durante el periodo de operación, lo cual pudo influir en la baja producción de biogás observada. Sin embargo, se evidenció la degradación de la materia orgánica y la formación de biol, lo que confirma el funcionamiento del sistema de digestión anaerobia.

Tabla 8. Parámetros de monitoreo

Fecha	Día	Peso	Humedad Amb.	Temperatura amb	Temperatura inter.
4/30/2025	1	5.7	26%	30.7°	26°
5/2/2025	2	5.9	29%	28.8°	27.3°
5/7/2025	3	6.25	27%	28°	26°
5/13/2025	4	8.75	29%	30.2°	35.1°
14/05/2025	5	6.1	30%	31.5°	33.9°
5/22/2025	6	8.4	35%	32.0°	27.4°
5/23/2025	7	8.9	35%	28.2°	24.1°
5/26/2025	8	10.15	46%	23.5°	21.3°
5/28/2025	9	10.35	33%	31.1°	24.1°
5/29/2025	10	10.55	51%	22.9°	23.6°
6/2/2025	11	12.55	56%	24.4°	22.3°
6/3/2025	12	11.7	61%	24.5°	20.6°
6/4/2025	13	12.45	45%	24.3°	23.5°
6/9/2025	14	13.15	38%	27.5°	23.6°
6/10/2025	15	13.45	46%	26.2°	27.5°
6/16/2025	16	12.65	58%	23.3°	19.6°
6/17/2025	17	12.6	59%	23.5°	21.2°

6/20/2025	18	12.3	79%	16.9°	14.3°
6/23/2025	19	13.25	67%	21.7°	20.6°
6/24/2025	20	13.15	82%	12.7°	17.8°

Elaboración propia en base a los datos del monitoreo del biodigestor de 20 L.

8.1.1.2 Etapa. 1.2. Implementación de un sistema de digestión anaerobia a escala mayor

Se implementó un sistema de digestión anaerobia a escala mayor con una capacidad de 160 L, utilizando como sustrato excretas de vacuno, residuos sólidos orgánicos (RSO) generados en la cafetería del Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan y agua de lluvia, con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema y su capacidad para la degradación de la materia orgánica y la obtención de biofertilizante (biol).

En la Tabla 9. Se presentan los componentes utilizados en la carga inicial del sistema, la cual estuvo conformada por 25 kg de excretas de vacuno, 5 kg de RSO y 5 L de agua, obteniendo un volumen total de sustrato de 35 kg. Esta mezcla permitió proporcionar las condiciones necesarias para el inicio del proceso de digestión anaerobia, aportando materia orgánica y microorganismos activos que favorecen la degradación biológica.

Tabla 9. Componentes de carga inicial sistema a mayor a escala

Mezcla de alimentación		
Componentes	Origen	Cantidad
Excretas de vacuno	Rancho casco	25 kg
RSO	Cafetería del TESCH	5 kg
Agua	Agua de lluvia	5 L

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, en la Tabla 10. Se muestra el seguimiento de las cargas de alimentación realizadas durante el periodo de operación del biodigestor. Se observa que el sistema mantuvo un volumen de trabajo constante de 160 L y, después del periodo inicial de retención hidráulica (semanas 2 a 5), se realizaron alimentaciones periódicas mediante la adición de residuos sólidos orgánicos y agua. Las cargas de alimentación presentaron un incremento progresivo en la cantidad de RSO incorporado, pasando de 4 kg en la semana 6 hasta 10 kg en la semana 12, lo que permitió evaluar la respuesta del sistema ante diferentes cantidades de sustrato.

Como resultado de estas alimentaciones, se observó la obtención gradual de biofertilizante (biol), registrándose volúmenes desde 6 L hasta 15 L conforme avanzó el periodo de operación. Este incremento en la producción de biol indica que el sistema logró mantener la actividad microbiológica y la degradación de la materia orgánica de manera progresiva. Asimismo, la estabilidad en el volumen de operación y la respuesta favorable del sistema ante el aumento de la carga orgánica evidencian un adecuado funcionamiento del biodigestor a escala mayor.

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema permitió el aprovechamiento eficiente de los residuos sólidos orgánicos y las excretas de vacuno, favoreciendo su transformación en un producto de valor agregado como el biofertilizante. Esto confirma la viabilidad de la digestión anaerobia a mayor escala como una alternativa sostenible para el manejo y valorización de residuos orgánicos dentro de la institución.

Tabla 10. Cargas de alimentación sistema a escala mayor.

Cargas de Alimentación							
Semana	Volumen del SDA	Tipo de alimentación	Excretas (kg)	RSO (kg)	Agua (L)	Volumen total de sustrato	Obtención de biol.
1	160 L	Carga Inicial	25	5	5	35 kg	Sin obtención
2-5	160 L	Sin alimentación (Periodo de TRH)	0	0	0	0	Sin obtención
6	160 L	Alimentación	0	4	2	6 kg	6 L
7	160 L	Alimentación	0	5	2	7 kg	7 L
8	160 L	Alimentación	0	6	4	10 kg	10 L
9	160 L	Alimentación	0	7	3	10 kg	10 L
10	160 L	Alimentación	0	7	4	11 kg	11 L
11	160 L	Alimentación	0	8	4	12 kg	12 L
12	160 L	Alimentación	0	10	5	15 g	15

Fuente: Elaboración propia

8.2 *Análisis de conglomerados del nivel de conocimiento sobre RSO*

El análisis de la encuesta aplicada a la comunidad del Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan (TESCH) se realizó mediante un análisis de conglomerados jerárquicos, representado a través de un dendrograma, el cual permitió identificar la existencia de tres grupos o clústeres principales entre los encuestados. Estos clústeres reflejan distintos patrones de conocimiento, actitudes y prácticas relacionadas con la separación y el manejo de los residuos sólidos orgánicos (RSO). El Clúster 1 se caracteriza por una mayor participación en la separación de residuos y por presentar un nivel elevado de conocimiento sobre el manejo de los RSO. En este grupo se concentran principalmente integrantes de la comunidad académica que muestran una mayor sensibilización ambiental y una aplicación más constante de prácticas adecuadas de separación y aprovechamiento de residuos.

El Clúster 2 corresponde a un nivel intermedio de conocimiento y participación, donde los encuestados poseen nociones generales sobre el manejo de los RSO, pero aplican las prácticas de separación de forma irregular, evidenciando áreas de oportunidad para fortalecer sus hábitos ambientales.

El Clúster 3 agrupa a los encuestados con un bajo nivel de conocimiento y menor participación en las prácticas relacionadas con el manejo de los residuos sólidos orgánicos, lo que indica una limitada apropiación de las estrategias de gestión de residuos dentro de la institución. Los resultados obtenidos a partir del análisis gráfico complementan la información del dendrograma, permitiendo visualizar de manera clara las tendencias predominantes en cada clúster. Las ilustraciones presentadas muestran las diferencias existentes entre los grupos identificados en cuanto al nivel de conocimiento, prácticas de separación, participación en actividades relacionadas con el manejo de residuos y disposición para el aprovechamiento de los RSO. En la Ilustración 7. Se presenta el dendrograma obtenido a partir del análisis de conglomerados jerárquicos, el cual permitió identificar tres grupos principales de

acuerdo con el nivel de conocimiento sobre el manejo de los residuos sólidos orgánicos (RSO) en la comunidad del TESCH.

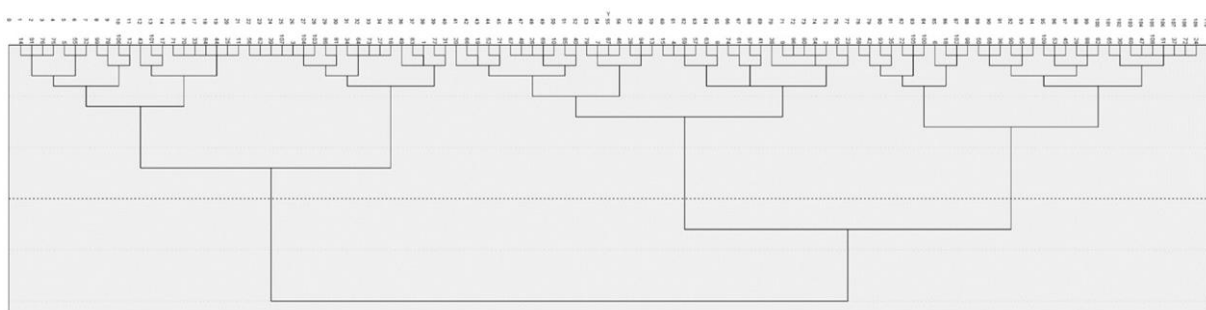


Ilustración 7. Dendrograma que utiliza el método de Ward

Fuente: Elaboración propia con el Software SPSS

Como se observa en la Ilustración 8. La adscripción de los participantes del TESCH varía de acuerdo con el nivel de conocimiento sobre los residuos sólidos orgánicos. En el nivel bajo predomina la participación de estudiantes (53%) y personal administrativo (47%), sin presencia de docentes. En el nivel intermedio se identifica una mayor representación de estudiantes (49%), seguido del personal administrativo (27%) y docentes (24%). Por su parte, en el nivel alto, destaca nuevamente la participación de estudiantes (58%), seguida del personal administrativo (30 %) y docentes (12 %), lo que evidencia que el conocimiento sobre los RSO se concentra principalmente en la población estudiantil.

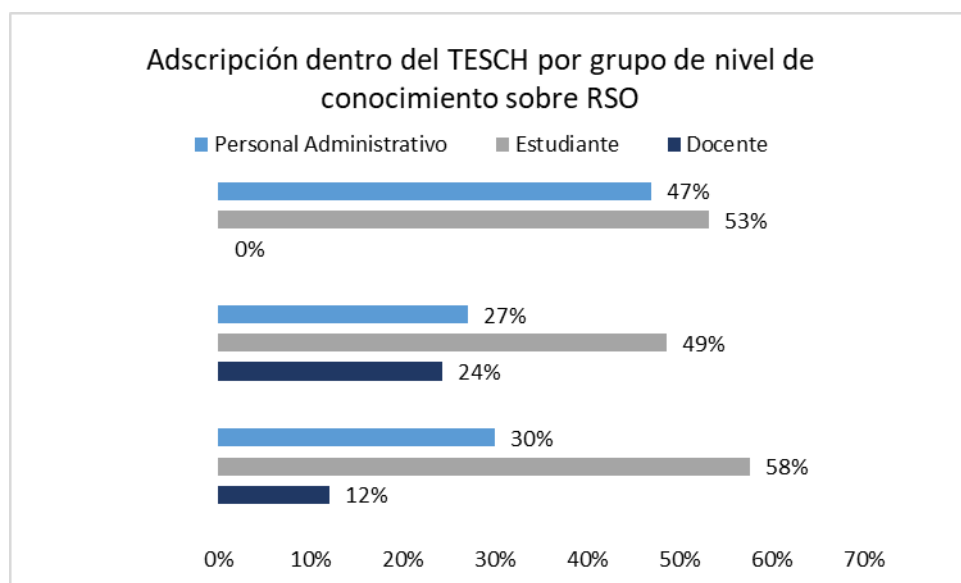


Ilustración 8. Adscripción dentro del TESCH por grupo de nivel de conocimiento sobre los RSO.

Elaboración propia con base en los datos obtenidos de la encuesta aplicada en el TESCH.

La Ilustración 9. Muestra el nivel de conocimiento declarado sobre los residuos sólidos orgánicos en función de los tres niveles establecidos. Se observa que, incluso en el nivel bajo, el 81 % de los encuestados afirma tener conocimiento sobre los RSO, mientras que en los niveles intermedio y alto este porcentaje aumenta al 84 % y 88 %, respectivamente. Estos resultados indican que existe un conocimiento generalizado sobre los RSO dentro de la comunidad educativa, aunque no necesariamente se traducen prácticas adecuadas de manejo.

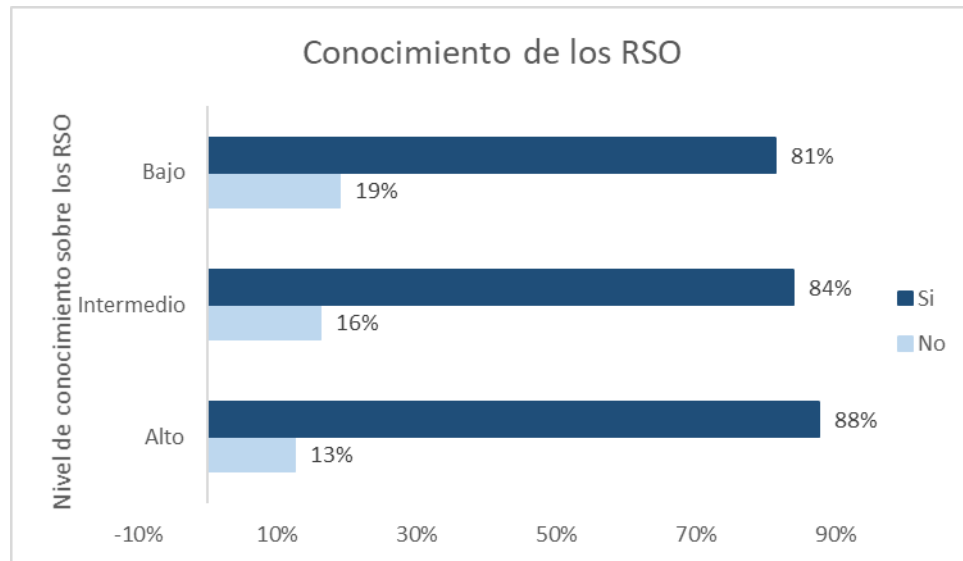


Ilustración 9. Conocimiento sobre los RSO.
Elaboración propia con base en los datos obtenidos de la encuesta aplicada en el TESCH.

En la Ilustración 10. se presenta la capacidad de identificación de los residuos sólidos orgánicos según el nivel de conocimiento. En el nivel bajo, el 56 % identifica parcialmente los RSO, mientras que solo el 34 % los identifica correctamente. En el nivel intermedio se observa una mejora, con un 65 % que identifica adecuadamente los RSO. En el nivel alto, el 48 % identifica correctamente y otro 48 % lo hace de manera parcial, lo que refleja que, aunque el conocimiento teórico es alto, aún existen áreas de oportunidad para fortalecer la identificación plena de los residuos orgánicos.

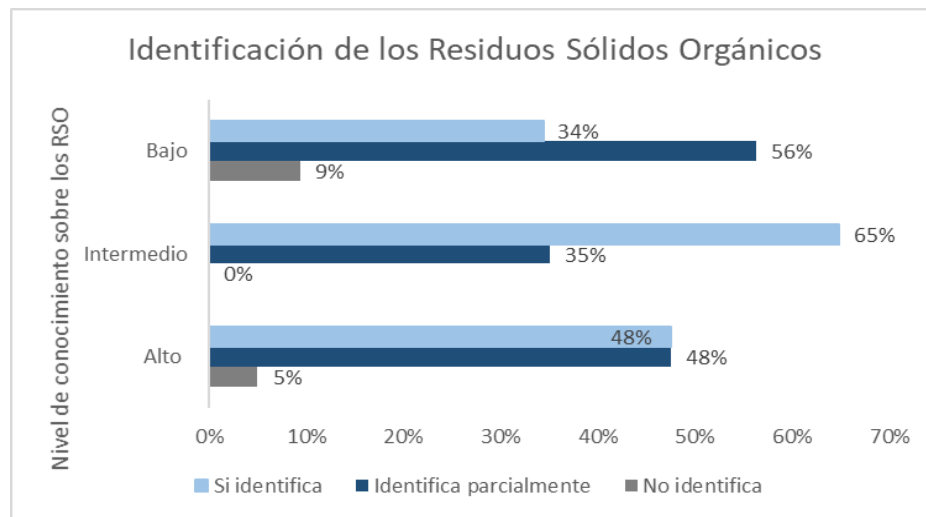


Ilustración 10. Identificación de los Residuos Sólidos Orgánicos (RSO).

Elaboración propia con base en los datos obtenidos de la encuesta aplicada en el TESCH

La Ilustración 11. Evidencia las prácticas de separación de residuos sólidos orgánicos en el hogar. En el nivel bajo, el 81 % separa los residuos solo ocasionalmente, mientras que únicamente el 13 % lo hace siempre. En el nivel intermedio, el 59 % separa los residuos algunas veces y el 14 % siempre. En el nivel alto se observa una mejora relativa, con un 23 % que separa siempre y un 70 % que lo hace ocasionalmente. Estos resultados reflejan que, aunque existe conciencia sobre los RSO, la separación constante aún no está plenamente consolidada como hábito.

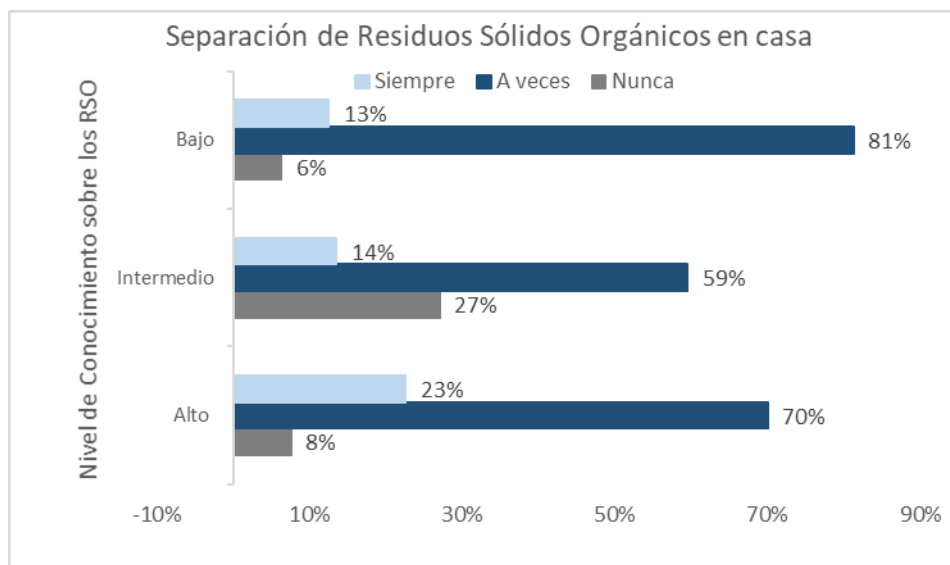


Ilustración 11. Separación de los Residuos Sólidos Orgánicos (RSO) en casa.

Elaboración propia con base en los datos obtenidos de la encuesta aplicada en el TESCH.

Como se muestra en la Ilustración 12. El destino final de los residuos sólidos orgánicos varía según el nivel de conocimiento. En el nivel bajo, el 47 % los dispone junto con la basura común, mientras que solo el 28 % los separa para composteo. En el nivel intermedio se observa una mejora, ya que el 38 % los destina al compostaje, aunque el 57 % aún los desecha con la basura común. En el nivel alto, el 43 % los separa para composteo, lo que indica una mayor adopción de prácticas sustentables, aunque todavía persiste un porcentaje significativo que no realiza un manejo adecuado.

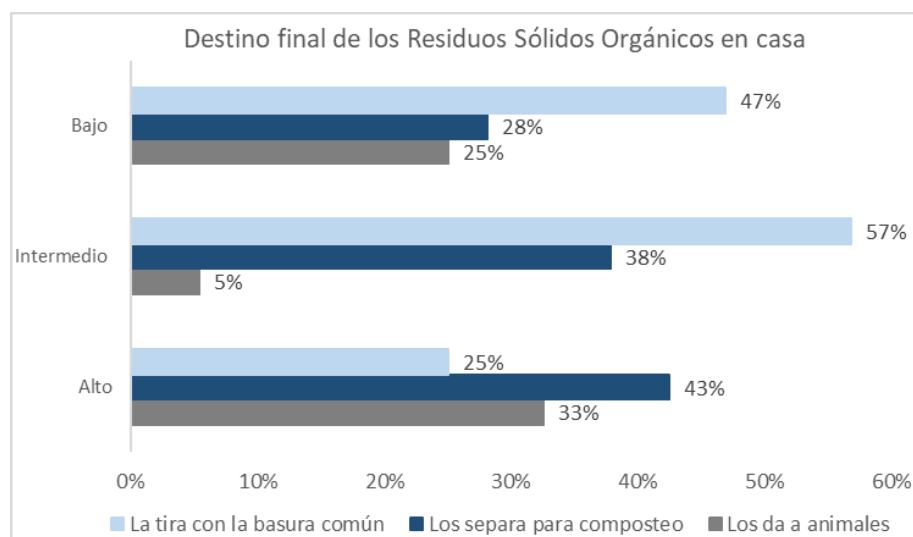


Ilustración 12. Destino final de los Residuos Sólidos Orgánicos (RSO) en casa.

Elaboración propia con base en los datos obtenidos de la encuesta aplicada en el TESCH.

En la Ilustración 13. Se muestra el nivel de identificación de los beneficios del aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos (RSO) por parte de la comunidad educativa del TESCH. Se observa que en el nivel bajo predomina la identificación de solo un beneficio (56%), lo que evidencia un conocimiento limitado sobre las ventajas del aprovechamiento de estos residuos. En contraste, en el nivel alto destaca que el 50% identifica al menos tres beneficios y el 33% reconoce hasta cuatro beneficios, lo que refleja una mayor conciencia ambiental y comprensión del impacto positivo del aprovechamiento de los RSO. Estos resultados indican que, a mayor nivel de conocimiento sobre los RSO, mayor es la capacidad de reconocer sus beneficios ambientales, sociales y económicos.

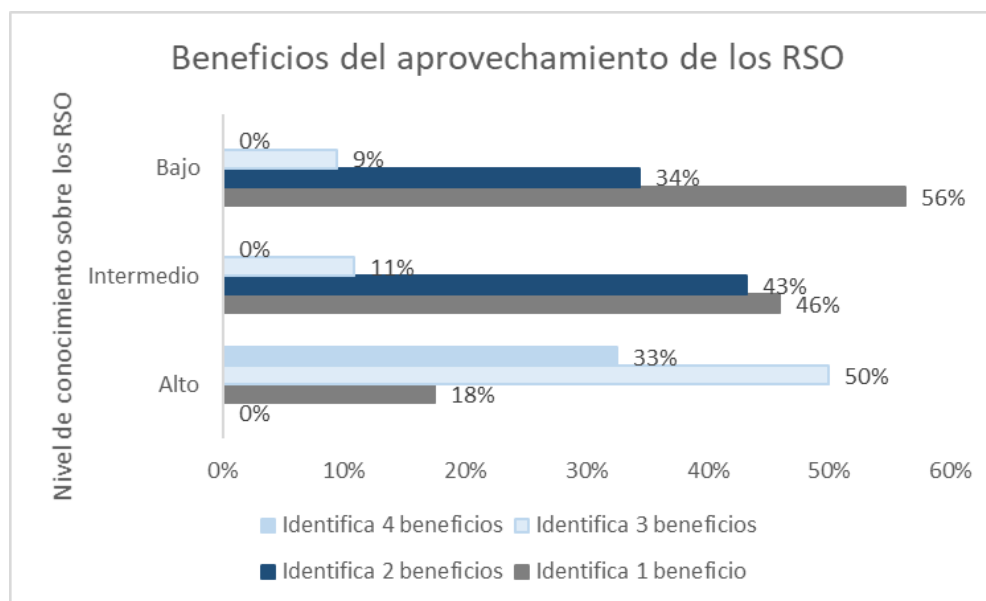


Ilustración 13. Beneficios del aprovechamiento de los Residuos Sólidos Orgánicos.

Elaboración propia con base en los datos obtenidos de la encuesta aplicada en el TESCH.

En la Ilustración 14. Se presenta el conocimiento que posee la comunidad educativa del TESCH sobre el composteo, clasificado por nivel de conocimiento sobre los RSO. Se observa que el conocimiento del composteo es elevado en los tres niveles, destacando el nivel alto, donde el 93% de los encuestados afirma conocer este proceso. En los niveles intermedio y bajo, el conocimiento también es significativo (65% y 78%, respectivamente), lo que sugiere que el composteo es una práctica relativamente difundida dentro de la comunidad, aunque no necesariamente aplicada de forma sistemática.

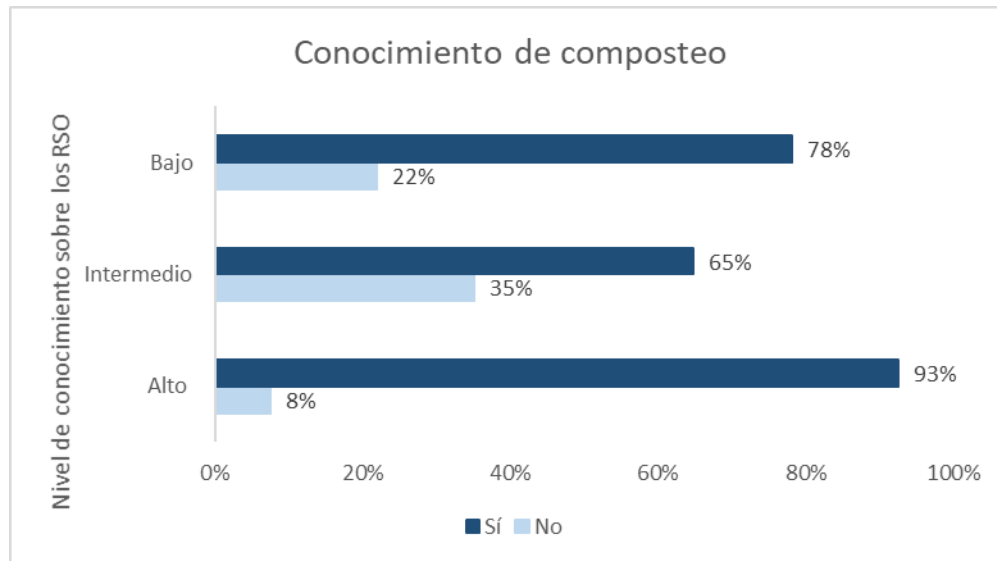


Ilustración 14. Conocimiento del composteo.

Elaboración propia con base en los datos obtenidos de la encuesta aplicada en el TESCH.

La Ilustración 15. Se muestra el grado de conocimiento sobre vermicompost y lombricomposta en la comunidad educativa del TESCH. En el nivel alto, el 78% de los encuestados afirma conocer estas técnicas, lo que indica una mayor familiaridad con alternativas de aprovechamiento de residuos orgánicos más especializadas. En contraste, en el nivel intermedio, el 65% señala no conocerlas, y en el nivel bajo se presenta una distribución equitativa entre quienes conocen y quienes no conocen estas prácticas. Estos resultados evidencian la necesidad de fortalecer la difusión y capacitación sobre tecnologías alternativas de aprovechamiento de residuos orgánicos.

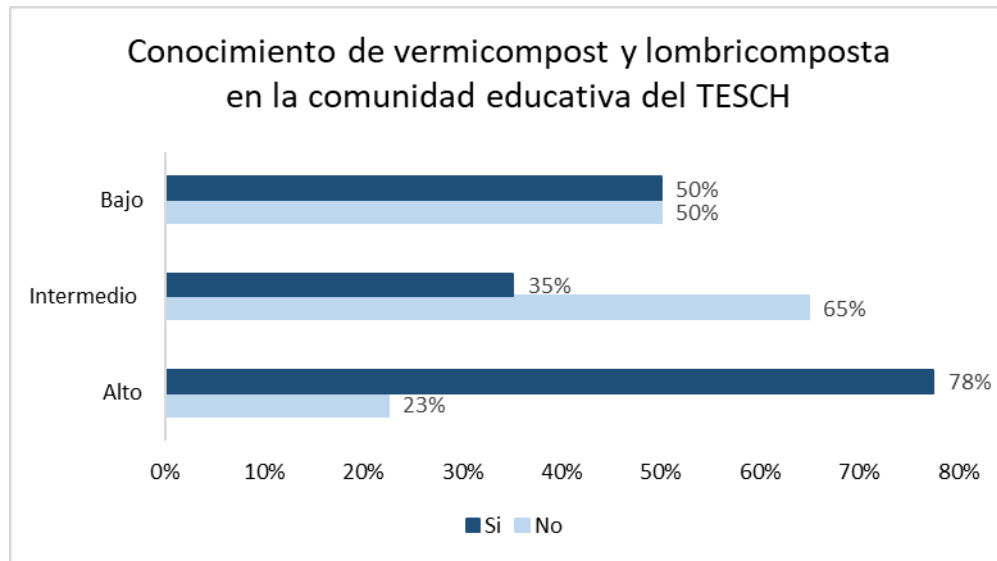


Ilustración 15. Conocimiento de vermicompost y lombricomposta en la comunidad educativa del TESCH.

Elaboración propia con base en los datos obtenidos de la encuesta aplicada en el TESCH.

En la Ilustración 16. Se presenta el conocimiento sobre los biodigestores dentro de la comunidad educativa del TESCH. Se observa que, en el nivel alto, el 78% de los encuestados afirma conocer esta tecnología, lo que indica una mayor familiaridad con sistemas de digestión anaerobia. En los niveles intermedio y bajo, el conocimiento disminuye, con valores del 57% y 50% respectivamente, lo cual evidencia que, aunque existe un reconocimiento general del concepto, aún es necesario fortalecer su difusión, especialmente en los sectores con menor nivel de conocimiento sobre los RSO.

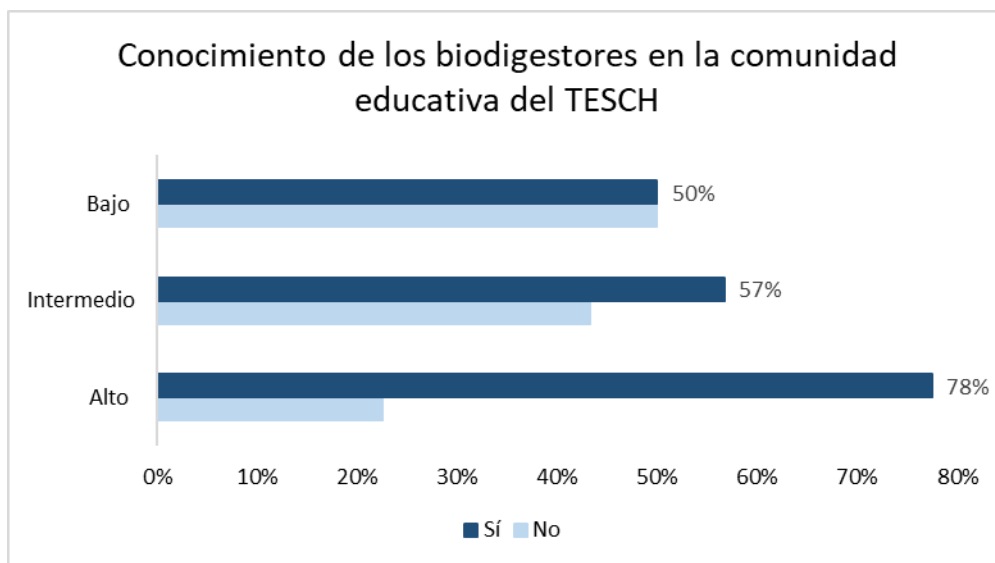


Ilustración 16. Conocimiento de los biodigestores en la comunidad educativa del TESCH.

Elaboración propia con base en los datos obtenidos de la encuesta aplicada en el TESCH.

En la Ilustración 17. Se muestra la disposición o experiencia de la comunidad educativa del TESCH en la elaboración de composta o biodigestores. Se observa que en los tres niveles predomina una alta disposición o experiencia, destacando el nivel alto con un 90% de respuestas afirmativas, seguido del nivel intermedio con 89% y del nivel bajo con 75%. Estos resultados reflejan una actitud favorable hacia la implementación de tecnologías de aprovechamiento de residuos orgánicos, lo cual representa una oportunidad importante para desarrollar proyectos ambientales dentro de la institución.

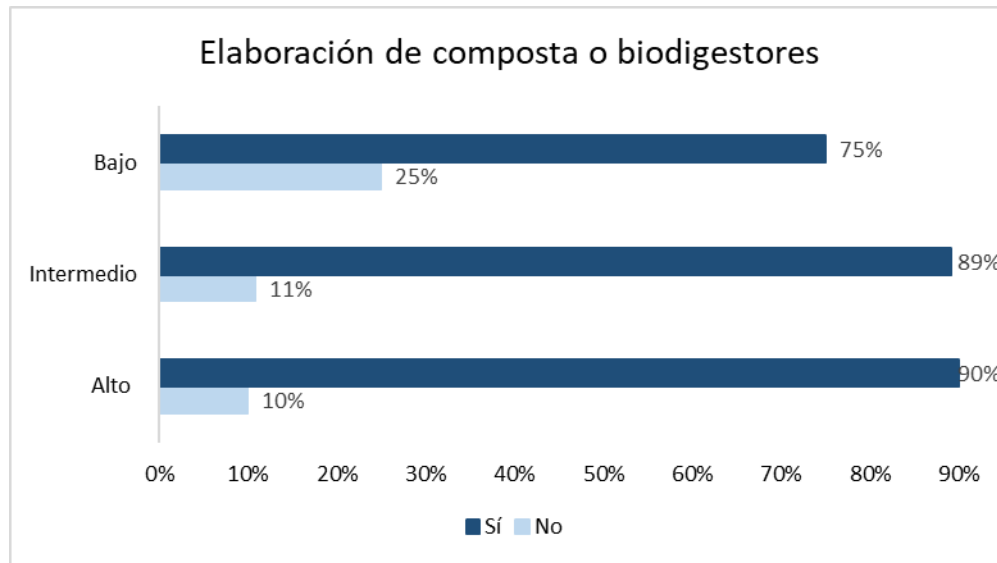


Ilustración 17. Elaboración de composta o biodigestores.

Elaboración propia con base en los datos obtenidos de la encuesta aplicada en el TESCH.

En la Ilustración 18. Se muestra la participación de la comunidad educativa del TESCH en programas de reciclaje o manejo de residuos sólidos orgánicos (RSO) de acuerdo con su nivel de conocimiento. Se muestra que, conforme aumenta el nivel de conocimiento, también se incrementa la participación en este tipo de programas. En el nivel alto, el 93% de los encuestados afirmó participar en programas relacionados con el manejo de RSO, mientras que en el nivel intermedio esta participación fue del 86% y en el nivel bajo del 78%.

Estos resultados indican una relación positiva entre el nivel de conocimiento sobre los RSO y el involucramiento activo en prácticas ambientales, lo que sugiere que la capacitación y sensibilización pueden fortalecer la participación en programas institucionales de manejo de residuos.

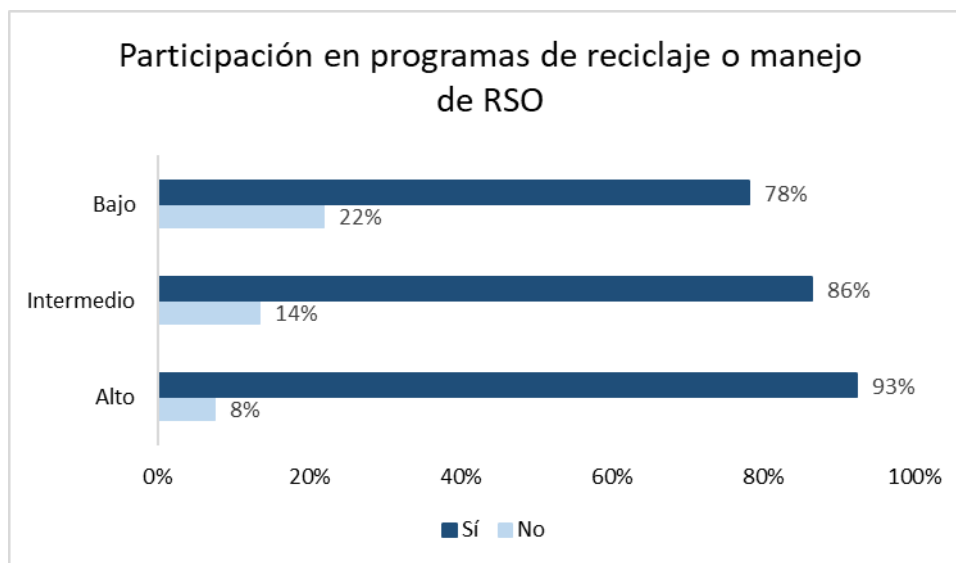


Ilustración 18. Participación en programas de reciclaje o manejo de RSO.

Elaboración propia con base en los datos obtenidos de la encuesta aplicada en el TESCH.

En la Ilustración 19. Se presentan las propuestas realizadas por la comunidad educativa para mejorar el manejo de los residuos sólidos orgánicos en el TESCH, clasificadas por nivel de conocimiento.

En el nivel bajo, la principal propuesta fue la implementación de campañas de recolección y separación de RSO (91%), lo que refleja una percepción inicial orientada a acciones básicas de gestión. En el nivel intermedio, destaca la creación de centros de compostaje comunitario (70%), seguida por talleres de compostaje (24%), lo que evidencia una mayor comprensión de alternativas técnicas para el aprovechamiento de los residuos. Por su parte, en el nivel alto se observa una distribución más equilibrada entre campañas de separación (33%), talleres de compostaje (28%) y centros de compostaje comunitario (40%), lo que sugiere una visión más integral sobre las estrategias necesarias para mejorar el manejo de los RSO.

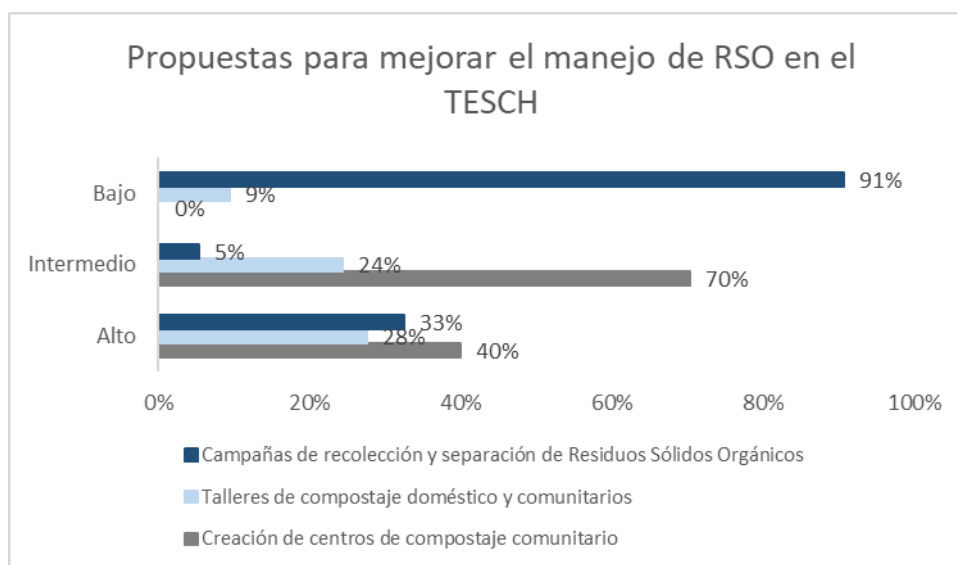


Ilustración 19. Propuestas para mejorar el manejo de RSO en el TESCH.

Elaboración propia con base en los datos obtenidos de la encuesta aplicada en el TESCH.

En la Ilustración 20. Se muestra la disposición de la comunidad educativa a participar en talleres relacionados con compostaje y biodigestores. Los resultados indican una alta aceptación en todos los niveles de conocimiento. En el nivel alto, el 93% manifestó estar dispuesto a participar en este tipo de talleres, seguido del nivel intermedio con un 89% y del nivel bajo con un 88%. Esta elevada disposición general evidencia un alto interés por parte de la comunidad educativa en adquirir conocimientos prácticos sobre el aprovechamiento de los residuos orgánicos, lo cual representa una oportunidad para implementar programas de capacitación que fortalezcan la gestión integral de los RSO dentro del TESCH. En conjunto, los resultados obtenidos a partir de estas gráficas evidencian que, si bien existe un conocimiento general sobre prácticas de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos dentro de la comunidad educativa del TESCH, este varía de acuerdo con el nivel de conocimiento sobre los RSO. Asimismo, se identifica una disposición favorable hacia la adopción de tecnologías como el composteo y los biodigestores, lo cual favorece la viabilidad de implementar estrategias de gestión integral de Residuos Sólidos Orgánicos.

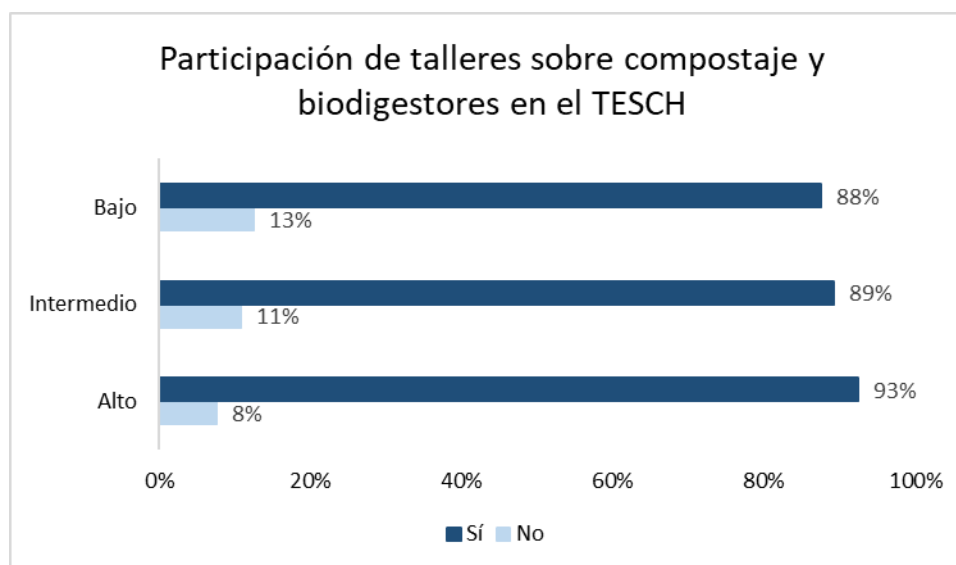


Ilustración 20. Participación de talleres sobre compostaje y biodigestores en el TESCH.

Elaboración propia con base en los datos obtenidos de la encuesta aplicada en el TESCH.

8.3 *Etapa 3: Relación Carbono Nitrógeno y análisis de microscopía electrónica de barrido.*

En esta etapa se presentan los resultados del análisis de la relación carbono-nitrógeno (C/N) de las muestras de biofertilizante obtenidas a partir de dos sustratos orgánicos: gallinaza y excretas de vacuno. Las muestras corresponden a biodigestores con distintos tiempos de operación, siendo de 8 meses para el sistema alimentado con gallinaza y de 5 meses para el sistema alimentado con excretas de vacuno. Adicionalmente, se incluyen observaciones obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido con el propósito de describir la morfología superficial del material orgánico presente en las muestras analizadas.

8.3.1 Relación Carbono Nitrógeno de Gallinaza con 8 meses de operación del biodigestor.

Los resultados del análisis realizado mediante el equipo de Carbono Orgánico Total (TOC) permitieron determinar las concentraciones de carbono total (TC), carbono inorgánico (IC) y nitrógeno total (TN) presentes en el biofertilizante obtenido a partir de gallinaza con 8 meses de operación del biodigestor. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Concentraciones de carbono total, carbono inorgánico y nitrógeno total del biofertilizante de gallinaza.

Parámetro	Valor	Unidad
Carbono Total (TC)	171.9	mg/L
Carbono Inorgánico (IC)	1.95	mg/L
Nitrógeno Total (TN)	137.7	mg/L

Fuente: Elaboración propia con base en el análisis fisicoquímico realizado mediante TOC en la UAM Unidad Cuajimalpa.

A partir de los valores de carbono total (TC) y nitrógeno total (TN) obtenidos en el análisis, se calculó la relación carbono-nitrógeno (C/N) mediante la siguiente ecuación:

$$C/N = \text{Carbono Total} / \text{Nitrógeno Total}$$

$$C/N = 171.9 / 137.7$$

$$C/N = 1.24$$

Los valores obtenidos son consistentes con lo reportado en estudios similares. De acuerdo con [28], el digestato obtenido a partir de gallinaza presenta concentraciones de nitrógeno total entre 120 y 180 mg/L, lo cual concuerda con el valor de 137.7 mg/L encontrado en este estudio. Asimismo, [29] reportan que el bajo contenido de carbono inorgánico en biofertilizantes derivados de excretas avícolas es característico de procesos anaerobios estables, lo cual coincide con el valor registrado de 1.95 mg/L.

Estos resultados confirman que el biofertilizante producido a partir de gallinaza en el presente trabajo se encuentra dentro de los rangos reportados en la literatura, lo que respalda su potencial uso agrícola como fuente nutrimental. Desde el punto de vista microbiológico, este valor indica que los microorganismos no requieren inmovilizar nitrógeno para su metabolismo, por lo que este nutriente queda disponible para las plantas de manera relativamente inmediata.

Complementando con lo anterior, se realizó un análisis mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). Las muestras fueron colocadas en una estufa de secado hasta alcanzar un contenido sólido con peso constante. A partir de este procedimiento se obtuvieron cinco micrografías correspondientes a cada muestra, de las cuales se seleccionaron dos al azar para el análisis de la morfología superficial y la topografía tridimensional de los materiales sólidos.

La microscopía electrónica de barrido permite analizar la estructura superficial de los materiales mediante la interacción de un haz de electrones con la muestra, generando principalmente

electrones secundarios que proporcionan información sobre la textura, porosidad y características morfológicas del material analizado [9]. Mediante el análisis de microscopía electrónica de barrido, con un aumento de 1000× y una escala aproximada de 10 µm, se observó la morfología superficial del material orgánico presente en el biol obtenido a partir de excretas de vacuno y gallinaza.

En la Ilustración 21 se observan estructuras de morfología filamentosa asociadas a restos de fibras vegetales en un estado intermedio de descomposición.

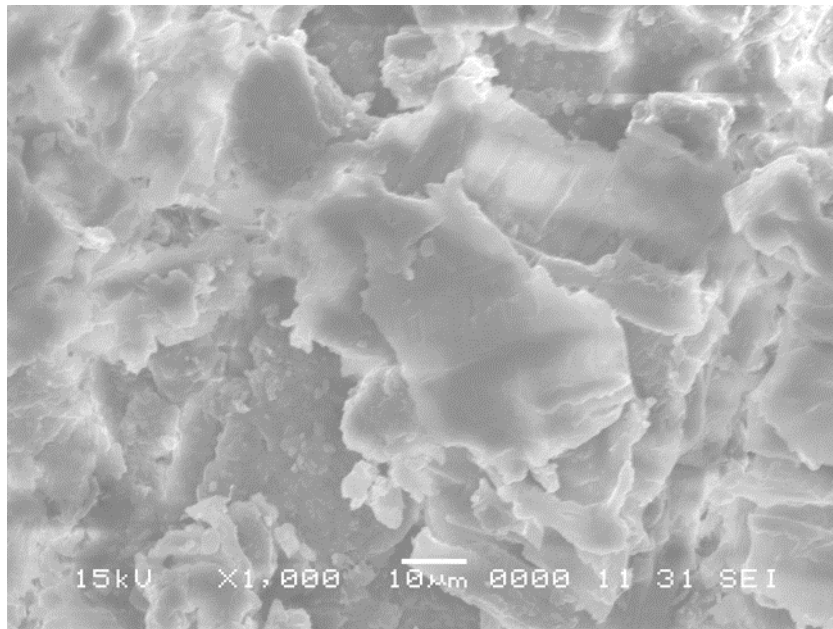


Ilustración 21. Microestructura del biol de gallinaza observada mediante microscopía electrónica de barrido (1000 x).

Fuente Instituto Tecnológico Superior de Uruapan, Centro de Investigación Aplicada (CIA), micrografía obtenida por R. O. Méndez Villarreal.

En la ilustración 22 se observan estructuras laminares y fragmentos irregulares compatibles con restos de fibras lignocelulósicas parcialmente degradadas, lo que corresponde a la formación de micro agregados estructurales asociados al proceso de descomposición de la materia orgánica.



Ilustración 22. Microestructura del biol observada mediante microscopía electrónica de barrido (1000 x).

Fuente Instituto Tecnológico Superior de Uruapan, Centro de Investigación Aplicada (CIA), micrografía obtenida por R. O. Méndez Villarreal.

8.3.2 Relación Carbono Nitrógeno de Vacuno con 5 meses de operación del biodigestor.

Los resultados del análisis realizado mediante el equipo de Carbono Orgánico Total (TOC) permitieron determinar las concentraciones de carbono total (TC), carbono inorgánico (IC) y nitrógeno total (TN) presentes en el biofertilizante obtenido a partir de excretas de vacuno con 5 meses de operación del biodigestor. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Concentraciones de carbono total, carbono inorgánico y nitrógeno total del biofertilizante de excretas de vacuno.

Parámetro	Valor	Unidad
Carbono Total (TC)	715.1	mg/L
Carbono Inorgánico (IC)	223.1	mg/L
Nitrógeno Total (TN)	724.3	mg/L

Fuente: *Elaboración propia con base en el análisis fisicoquímico realizado mediante TOC en la UAM Unidad Cuajimalpa.*

A partir de los valores de carbono total (TC) y nitrógeno total (TN) obtenidos en el análisis, se calculó la relación carbono-nitrógeno (C/N) mediante la siguiente ecuación:

$C/N = \text{Carbono Total} / \text{Nitrógeno Total}$

$$C/N = 715.1 / 724.3$$

$$C/N = 0.98$$

En comparación con el biofertilizante derivado de gallinaza, este resultado indica una mayor disponibilidad de nitrógeno en el sistema, lo que sugiere un material altamente activo y de rápida disponibilidad nutrimental para su aplicación agrícola.

Asimismo, el contenido de carbono inorgánico registrado fue de 223.1 mg/L, mientras que el nitrógeno total alcanzó un valor de 724.3 mg/L. Estos resultados reflejan diferencias en la composición fisicoquímica del biofertilizante asociadas al tipo de sustrato empleado y al tiempo de operación del biodigestor.

La mayor concentración de carbono total y nitrógeno observada en el biofertilizante derivado de excretas de vacuno concuerda con lo señalado por Mendoza quien reporta valores de nitrógeno total superiores a 700 mg/L en digestato provenientes de estiércol de vacuno, especialmente en periodos cortos de operación [30]. De manera similar, la FAO menciona que los biodigestores alimentados con excretas bovinas tienden a generar biofertilizantes con alta carga nutrimental debido al contenido proteico y fibroso del sustrato original [25].

Por lo tanto, los resultados obtenidos en este estudio se encuentran dentro de los rangos reportados para biofertilizantes derivados de estiércol bovino, lo que confirma su potencial como insumo agrícola para la mejora de la fertilidad del suelo y el suministro de nutrientes esenciales para los cultivos.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que la relación carbono-nitrógeno del biofertilizante producido mediante digestión anaerobia se encuentra dentro de los rangos reportados en la literatura para este tipo de sustratos, lo que respalda su viabilidad como alternativa sostenible para el aprovechamiento de residuos orgánicos y la producción de biofertilizantes en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan.

Comparado con el biofertilizante de gallinaza; este biofertilizante tiene una relación C/N de 0.98mg/L; indica que el biofertilizante es altamente activo, de rápida acción y nutricionalmente concentrado, ideal para aplicaciones foliares o al suelo en etapas de crecimiento, dentro de un

sistema agroecológico. Asimismo, el contenido de carbono inorgánico fue de 223.1 mg/L, mientras que el nitrógeno total alcanzó un valor de 724.3 mg/L. Estos resultados reflejan diferencias en la composición fisicoquímica del biofertilizante asociadas al tipo de sustrato y al tiempo de almacenamiento considerado.

Los valores de carbono y nitrógeno obtenidos evidencian el potencial del biofertilizante como insumo agrícola, particularmente para la mejora de la fertilidad del suelo y el aporte de nutrientes esenciales a los cultivos. Asimismo, estos resultados respaldan la viabilidad técnica del sistema de digestión anaerobia implementado en el presente trabajo como una alternativa sostenible para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan.

Complementando al análisis anterior, se realizó un análisis mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) a las muestras de biol obtenidas a partir de excretas de vacuno con 5 meses de operación del biodigestor.

Las muestras fueron previamente colocadas en una estufa de secado hasta alcanzar un contenido sólido con peso constante. Posteriormente se obtuvieron micrografías que permitieron analizar la morfología superficial y la topografía tridimensional del material orgánico presente en el biofertilizante. La microscopía electrónica de barrido permite observar la estructura superficial de los materiales mediante la interacción de un haz de electrones con la muestra, generando principalmente electrones secundarios que proporcionan información sobre textura, porosidad y características morfológicas del material analizado

En la Ilustración 23 se distinguen estructuras alargadas y fragmentos laminares asociados a residuos lignocelulósicos parcialmente degradados [8]. Lo que corresponde a la formación de micro agregados estructurales generados por la actividad biológica y la transformación progresiva de la materia orgánica.

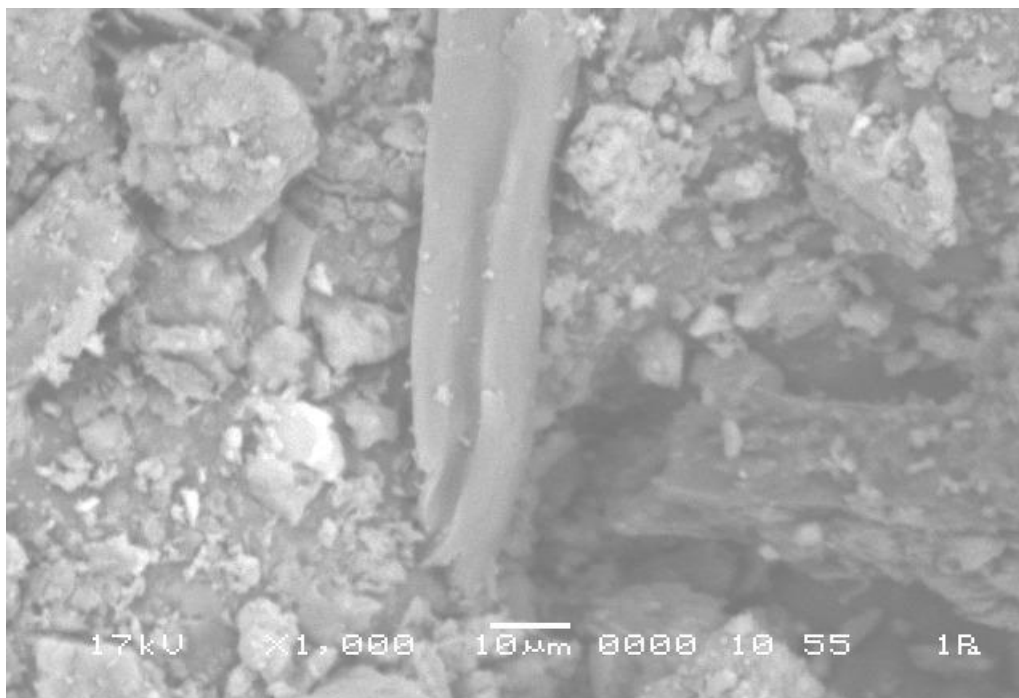


Ilustración 23. Microestructura del biol observada mediante microscopía electrónica de barrido (1000 x).

Fuente Instituto Tecnológico Superior de Uruapan, Centro de Investigación Aplicada (CIA), micrografía obtenida por R. O. Méndez Villarreal.

En la Ilustración 24 se observan estructuras heterogéneas y amorfas compatibles con fibras vegetales de tipo lignocelulósico en un estado intermedio de degradación, las cuales presentan una microestructura porosa característica de materiales orgánicos sometidos a procesos de descomposición biológica.

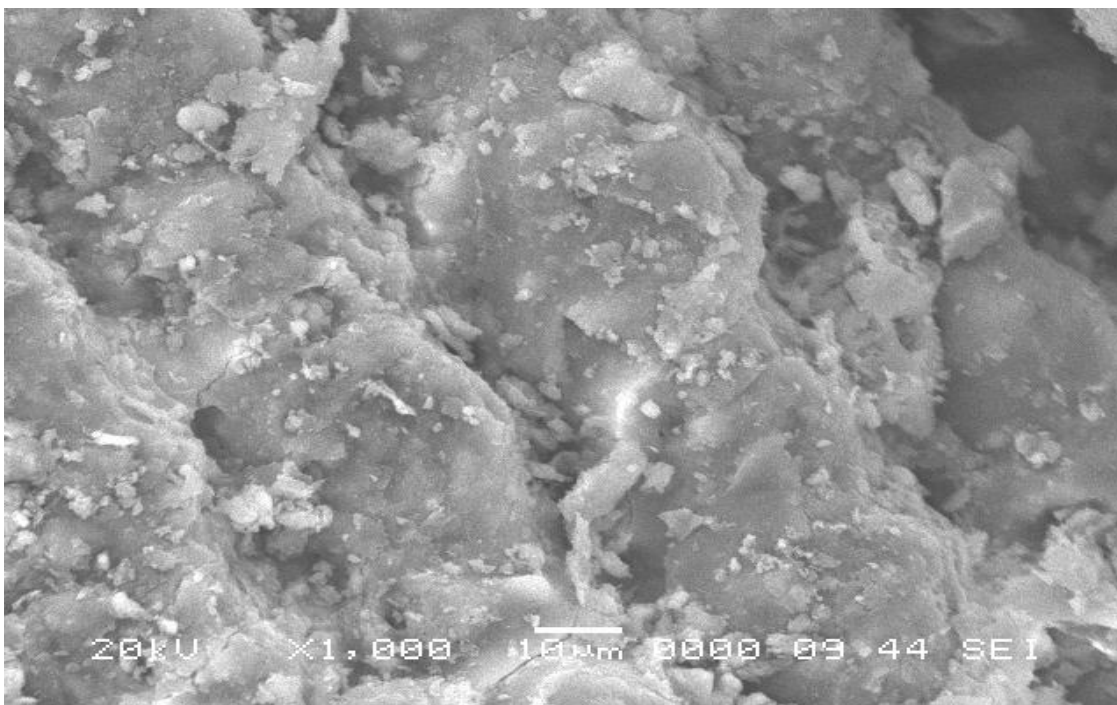


Ilustración 24. Microestructura del biol observada mediante microscopía electrónica de barrido (1000 x).

Fuente Instituto Tecnológico Superior de Uruapan, Centro de Investigación Aplicada (CIA), micrografía obtenida por R. O. Méndez Villarreal.

Con base en el análisis microscópico realizado a un aumento de 1000× en las cuatro muestras orgánicas evaluadas, se identificaron diversas estructuras biológicas asociadas a residuos lignocelulósicos parcialmente degradados, micro agregados orgánicos y estructuras porosas características de materiales en proceso de descomposición. Estas observaciones permiten inferir el estado de degradación del material orgánico presente en el biol y su posible comportamiento agronómico.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que el biofertilizante aún se encuentra en una fase intermedia de estabilización, por lo que se recomienda continuar el proceso de maduración del biol con el fin de mejorar su estabilidad, calidad nutrimental y seguridad sanitaria. Este proceso favorecerá una mayor mineralización de la materia orgánica y permitirá potenciar su uso como insumo para la mejora de la fertilidad y estructura del suelo.

8.4 *Manual de manejo y aprovechamiento de RSO y la implementación y mantenimiento de un sistema de digestión anaerobia.*

Una de las tecnologías más eficientes para el aprovechamiento de los RSO es la digestión anaerobia, proceso mediante el cual la materia orgánica es degradada en ausencia de oxígeno, generando biogás como fuente de energía renovable y biofertilizantes como subproductos de valor agrícola [25]. Esta tecnología permite reducir el volumen de residuos enviados a disposición final y mitigar impactos ambientales. Con base a ello se generó el manual que se presenta en el ANEXO 2.



**Manual de aprovechamiento de Residuos
Sólidos Orgánicos en la implementación de
un sistema de digestión anaerobia**

Elaborado por:

Naidelin García Rodríguez

Asesorado por:

**Biol. Beatriz Rivera Olivares
M. en IQ. Sergio Hernández Jiménez**



Ilustración 25. Portada del Manual

Elaboración propia

Los resultados obtenidos en la presente investigación demuestran que la implementación de un sistema de digestión anaerobia a escala piloto permitió el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, confirmando su viabilidad como alternativa para la valorización de estos residuos. La cuantificación realizada durante el periodo de marzo a noviembre evidenció una generación variable de residuos sólidos orgánicos, destacando el mes de marzo con un total de 29 kg, seguido de septiembre con 28.8 kg y junio con 27.3 kg. Esta variabilidad está directamente relacionada con la actividad académica dentro de la institución, ya que durante los periodos de mayor presencia estudiantil se incrementa la generación de residuos, mientras que en los periodos vacacionales se observa una disminución significativa. Estos resultados coinciden con lo reportado por SEMARNAT quien señala que la generación de residuos sólidos orgánicos en instituciones educativas depende principalmente de los patrones de consumo y la actividad humana [17].

La implementación del biodigestor a escala menor permitió evaluar el comportamiento del proceso de digestión anaerobia bajo condiciones controladas. Durante el periodo de operación, se observó la degradación de la materia orgánica y la obtención de biol como producto del proceso, lo que confirma el desarrollo de la actividad microbiológica dentro del sistema. La formación de biol es un indicador del proceso de estabilización de la materia orgánica, ya que durante la digestión anaerobia los compuestos orgánicos complejos son transformados en compuestos más simples mediante la acción de microorganismos anaerobios, generando subproductos líquidos ricos en nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, los cuales pueden ser utilizados como biofertilizantes. Estos resultados coinciden con lo reportado por Bernal et al. [5] y Rojas [28], quienes señalan que la digestión anaerobia permite la transformación de residuos orgánicos en biofertilizantes con valor agronómico, contribuyendo al reciclaje de nutrientes y al mejoramiento de la fertilidad del suelo. Sin embargo, la producción de biogás fue limitada, lo cual puede atribuirse principalmente a las condiciones operativas del sistema, particularmente a la hermeticidad del biodigestor y a las condiciones de temperatura registradas durante el periodo de operación. El monitoreo de parámetros fisicoquímicos mostró que la temperatura interna del biodigestor osciló entre 14.3 °C y 35.1 °C, mientras que la temperatura

ambiental presentó valores entre 12.7 °C y 32.0 °C. Estas condiciones corresponden a un rango mesofílico bajo y, en algunos momentos, a condiciones cercanas al rango psicrófilo, lo cual pudo afectar la actividad de los microorganismos metanogénicos responsables de la producción de metano. De acuerdo con Appels et al. [26], la producción óptima de metano ocurre en rangos de temperatura mesofílicos estables entre 30 °C y 40 °C, ya que temperaturas inferiores reducen la actividad metabólica de las arqueas metanogénicas, disminuyendo la producción de biogás.

Asimismo, la posible presencia de fugas o entradas de oxígeno en el sistema pudo haber afectado la eficiencia del proceso, ya que los microorganismos metanogénicos son estrictamente anaerobios y altamente sensibles a la presencia de oxígeno. Según Khalid et al. [2], la eficiencia de la digestión anaerobia depende en gran medida de mantener condiciones estrictamente anaerobias, ya que la presencia de oxígeno puede inhibir el desarrollo de las arqueas metanogénicas, reduciendo la producción de metano.

A pesar de estas limitaciones, la obtención de biol confirma que el proceso de digestión anaerobia se llevó a cabo de manera parcial, permitiendo la transformación de la materia orgánica y la generación de un subproducto con potencial aplicación agrícola.

La caracterización del biofertilizante obtenido y su análisis mediante técnicas fisicoquímicas y microscópicas permitió identificar la presencia de materia orgánica estabilizada y actividad microbiológica, lo cual coincide con lo reportado por [28], quienes señalan que la digestión anaerobia permite el desarrollo de comunidades microbianas capaces de transformar residuos orgánicos en compuestos más estables y aprovechables.

Por otra parte, la implementación del biodigestor a escala mayor permitió evaluar la viabilidad del sistema bajo condiciones de mayor capacidad, observándose un comportamiento similar al del biodigestor a escala menor. La degradación de la materia orgánica y la obtención de biol evidencian que el sistema fue funcional, aunque la producción de biogás pudo haberse visto limitada por factores operativos similares, como la temperatura y la hermeticidad del sistema.

En este sentido, la implementación del sistema de digestión anaerobia en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan representa una alternativa viable para el manejo integral

de los residuos sólidos orgánicos, contribuyendo a su aprovechamiento y valorización. Además, este tipo de sistemas permite reducir el impacto ambiental asociado a la disposición inadecuada de residuos orgánicos, alineándose con los principios de economía circular y sostenibilidad.

Finalmente, los resultados obtenidos demuestran que, aunque la producción de biogás fue limitada debido a factores operativos como la temperatura y la hermeticidad del sistema, la obtención de biofertilizante confirma la viabilidad del proceso de digestión anaerobia como una estrategia efectiva para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos en instituciones educativas, contribuyendo al desarrollo de soluciones sostenibles para la gestión de residuos.

9. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo, se puede concluir que se cumplió el objetivo general, el cual consistió en implementar un sistema de digestión anaerobia a escala piloto para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan (TESCH), incluyendo su caracterización, el análisis del biol y la elaboración de un manual técnico.

La implementación de un sistema de digestión anaerobia a escala piloto permitió evaluar el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en el TESCH. Por otro lado, la caracterización de los residuos permitió identificar su potencial como sustrato para la digestión anaerobia. Además, el análisis del biol evidenció su posible uso como mejorador de suelo.

Aparte, el diagnóstico realizado en la comunidad educativa demostró la importancia de fortalecer la educación ambiental y la correcta separación de residuos, además de permitir identificar alternativas de aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos que se pueden implementar dentro de la institución.

Finalmente, la elaboración de un manual técnico sirve como guía para la implementación, operación y mantenimiento del biodigestor, contribuyendo al manejo sustentable de los residuos sólidos orgánicos

10. Referencias

- [1] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata y F. Van Woerden, *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*, Washington, DC: World Bank, 2018.
- [2] A. Khalid, M. Arshad, M. Anjum, T. Mahmood y L. Dawson, «The anaerobic digestion of solid organic waste,» *Waste Management*, vol. 31, nº 8, pp. 1737-1744, 2011.
- [3] T. Abbasi, S. M. Tauseef y S. A. Abbasi, *Biogas Energy*, New York, NY: Springer Science & Business Media, 2011.
- [4] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), *Biogas Technology: A Training Manual for Extension*, Rome: FAO, 2011.
- [5] M. Bernal, J. Alburquerque y R. Moral, «Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment,» *Bioresource Technology*, vol. 100, nº 22, pp. 5444-5453, 2009.
- [6] J. Venegas-Venegas, «Biogás: situación actual, potencial de generación en granjas porcinas y beneficios ambientales en Puebla,» *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 8, nº 4, 2017.
- [7] Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO), «Situación actual y escenarios para el desarrollo del biogás en México,» REMBIO, Ciudad de México , 2023.
- [8] V. S. P. J., *Nutritional Ecology of the Ruminant*, Ithaca, NY: Cornell University Press, 1994.
- [9] G. J. I., *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, New York, NY: Springer, 2003.

- [10] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, «Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente,» Diario Oficial de la Federación, México , 2026.
- [11] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, «Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos,» Diario Oficial de la Federación, México, 2023.
- [12] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, «Ley de Transición Energética,» Diario Oficial de la Federación, México , 2023.
- [13] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), «NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial,» Diario Oficial de la Federación, México , 2004.
- [14] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), «NOM-001-SEMARNAT-2021, Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación,» Diario Oficial de la Federación, México, 2021.
- [15] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT),, « NOM-044-SEMARNAT-2017, Límites máximos permisibles de emisión de contaminantes para vehículos automotores que utilizan diésel como combustible,» Diario Oficial de la Federación, México , 2017.
- [16] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), «Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos,» SEMARNAT, México , 2015.
- [17] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), «Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos,» SEMARNAT, Ciudad de México, 2019.
- [18] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) , «Bioenergy and food security,» FAO, Rome, Italy , 2019.

- [19] A. C. , M. Monroy y J. Domínguez, «“Earthworms strongly modify microbial biomass and activity triggering enzymatic activities during vermicomposting,» *Bioresource Technology*, vol. 98, p. 3267–3273, 2007.
- [20] R. Kothari, «Different aspects of anaerobic digestion,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020.
- [21] International Renewable Energy Agency (IRENA) , «Biogas for road vehicles,» IRENA, 2019.
- [22] International Energy Agency (IEA), « Biogas country overviews,» IEA Bionergy, Paris, France: , 2020.
- [23] Secretaría de Energía (SENER) , «Prospectiva de energías renovables 2020–2034,» SENER, Ciudad de México , 2020.
- [24] International Energy Agency (IEA) , «Anaerobic digestion of organic wastes. Technology Brief.,» IEA , Paris, France, 2018.
- [25] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), «Bioenergy and food security,» FAO, Rome, Italy, 2017.
- [26] Appels et al., «Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges,» *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 63, pp. 119-146, 2017.
- [27] I. A. e. al, «Anaerobic bioconversion of biomass to biogas,» *A review Water Research*, vol. 45, nº 3, p. 123–135, 2011.
- [28] J. Rojas, «Evaluación de digestatos provenientes de biodigestores alimentados con gallinaza para su uso como biofertilizante,» de *Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Bogotá*, 2015.

- [29] M. López y A. Martínez, «Caracterización fisicoquímica de biofertilizantes derivados de residuos pecuarios mediante digestión anaerobia,» *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental*, vol. 9, nº 2, p. 45–53, 2018.
- [30] J. P. Mendoza, « Caracterización fisicoquímica de digestatos provenientes de biodigestores alimentados con estiércol bovino para su uso como biofertilizante,» *Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria*, 2016.

11. Anexos

11.1 Anexo 1. Encuesta

El manejo e importancia de los residuos sólidos orgánicos en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan.

Instrucciones: Subraya la respuesta que consideres que es la correcta

Nombre:

Edad:

Sexo:

M () F ()

1. Indique su adscripción dentro del TESCH
 - a) Estudiante
 - b) Docente
 - c) Personal administrativo
2. ¿Sabe qué son los residuos sólidos orgánicos (RSO)?
 - a) Si
 - b) No
3. ¿Identifica qué son los residuos sólidos orgánicos (RSO)? (puede marcar varias)
 - a) Restos de comida
 - b) Cáscaras de frutas y verduras
 - c) Papel y cartón
 - d) Hojas y ramas
 - e) Plásticos
4. ¿Considera importante la separación de residuos sólidos orgánicos (RSO)?
 - a) Si
 - b) No
5. ¿En su casa separan los residuos sólidos orgánicos (RSO) de los residuos sólidos inorgánicos (RSI)?
 - a) Siempre
 - b) A veces
 - c) Nunca
6. ¿Qué hace principalmente con los residuos sólidos orgánicos (RSO) de su casa?

- a) La tira con la basura común
- b) Los separa para composteo
- c) Los da a animales

7. ¿Cuál considera que es la principal dificultad para separar los residuos sólidos orgánicos (RSO)?

- a) Ausencia de contenedores diferenciados
- b) Por los malos olores que producen los residuos sólidos orgánicos (RSO)
- c) Para ahorrar tiempo

8. ¿Qué beneficios cree que tiene el aprovechamiento de los residuos orgánicos? (marque los que considere)

- a) Reducir la basura en los tiraderos
- b) Producir abono o composta
- c) Generar energía (biogás)
- d) Evitar malos olores

9. ¿Sabe qué es el composteo o identifica el proceso de compostaje?

- a) Sí
- b) No

10. ¿Conoce qué es la vermicompost y la lombricomposta?

- a) Sí
- b) No

11. ¿Conoce qué son los biodigestores y para qué sirven?

- a) Sí
- b) No

12. ¿Le interesaría aprender a elaborar composta o biodigestores?

- a) Sí
- b) No

13. ¿Estaría dispuesto(a) a participar en programas de reciclaje o manejo de residuos sólidos orgánicos (RSO)?

- a) Sí
- b) No



Manual de aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos en la implementación de un sistema de digestión anaerobia

Elaborado por:

Naidelin García Rodríguez

Asesorado por:

Biol. Beatriz Rivera Olivares

M. en IQ. Sergio Hernández Jiménez

12. ÍNDICE

13.

1.	Introducción.....	91
2.	Objetivo general	92
2.1.	Objetivos específicos	92
3.	Marco normativo aplicable	93
3.1.	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)	93
3.2.	Normas Oficiales Mexicanas relacionadas con RSO y biodigestores.....	93
3.3.	Normativa ambiental aplicable en instituciones educativas	94
4.	Manejo integral de los residuos sólidos orgánicos (RSO)	95
4.1.	Aprovechamiento de los RSO mediante compostaje.....	95
4.2.	Aprovechamiento de los RSO mediante lombricomposta.....	95
4.3.	Aprovechamiento de los RSO mediante Digestión anaerobia.....	96
5.	Biodigestor tubular	96
5.1.	Ventajas y limitaciones del biodigestor tubular.....	97
5.2.	Materiales y equipos para la instalación del biodigestor	97
5.2.1.	Materiales de instalación.....	97
5.2.2.	Herramientas.....	98
5.2.3.	Equipo de protección personal (EPP).....	100
6.	Montaje del sistema.....	100
7.	Selección y clasificación de sustratos.....	103
7.1.	Preparación del sustrato	104

7.2.	Carga Inicial y alimentación del biodigestor.....	107
8.	Manejo y uso de producto generados del biodigestor	110
8.1.	Manejo y uso del biogás	110
8.2.	Manejo y uso del biol.....	111
8.3.	Manejo y uso del digestato	112
9.	Mantenimiento del sistema.....	113
9.1.	Mantenimiento preventivo.....	113
9.2.	Mantenimiento correctivo	114
9.3.	Registro de operación	116
10.	Medidas de seguridad	120
10.1.	Riesgos potenciales	120
10.2.	Procedimientos ante fallas	120
11.	Glosario.....	121
12.	Referencias	122

Tabla 1. Ventajas y Limitaciones del Biodigestor Tubular.	97
Tabla 2. Materiales de instalación.	98
Tabla 3. Herramientas y equipo Auxiliar.	99
Tabla 4. Equipo de protección y seguridad personal (EPP).	100
Tabla 5. Formato de registro de alimentación y monitoreo del biodigestor.	117
Tabla 6. registro de monitoreo de factores ambientales del biodigestor.	119

Ilustración 1. Herramientas y equipo Auxiliar.	99
Ilustración 2. Equipo de protección y seguridad personal (EPP).	101
Ilustración 3. Proceso de montaje del biodigestor.	101
Ilustración 4. Procesos del procedimiento para la instalación y montaje del sistema.	102
Ilustración 5. Sustratos recomendables y sustratos prohibidos.	103
Ilustración 6. Proceso de preparación del sustrato a partir de residuos sólidos orgánicos (selección, reducción de tamaño y mezcla).	105
Ilustración 7. Procedimiento de la preparación de sustratos.	106
Ilustración 8. Proceso de alimentación del biodigestor con sustrato orgánico previamente preparado.	108
Ilustración 9. Procedimiento de la carga inicial.	109
Ilustración 10. Procesos para el manejo y uso del biogás.	111
Ilustración 11. Procesos para el manejo y uso del Biol.	112
Ilustración 12. Procesos para el manejo y uso del digestato.	113
Ilustración 13. Procesos para el mantenimiento preventivo.	114
Ilustración 14. Procesos para el mantenimiento correctivo.	115

1. Introducción

El manejo inadecuado de los Residuos Sólidos Orgánicos (RSO) representa uno de los principales problemas ambientales en instituciones educativas y comunidades urbanas, debido a la generación de contaminación, malos olores y emisiones de gases de efecto invernadero [1]. No obstante, cuando estos residuos son gestionados adecuadamente, pueden convertirse en recursos útiles mediante su aprovechamiento energético y agrícola, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la economía circular [2].

Una de las tecnologías más eficientes para el aprovechamiento de los RSO es la digestión anaerobia, proceso mediante el cual la materia orgánica es degradada en ausencia de oxígeno, generando biogás como fuente de energía renovable y biofertilizantes como subproductos de valor agrícola [3]. Esta tecnología permite reducir el volumen de residuos enviados a disposición final y mitigar impactos ambientales.

En el ámbito educativo, los biodigestores representan una alternativa viable para fomentar la educación ambiental y el desarrollo de proyectos sustentables, especialmente mediante sistemas de pequeña escala como el biodigestor tubular, el cual se caracteriza por su bajo costo, facilidad de instalación y operación [4].

El presente manual tiene como objetivo orientar el manejo y aprovechamiento de los RSO generados en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan (TESCH), mediante el diseño, operación y mantenimiento de un biodigestor tubular, promoviendo una gestión adecuada de residuos, la producción de biogás y la obtención de biofertilizantes, bajo criterios técnicos, ambientales y de seguridad.

2. Objetivo general

Elaborar un manual técnico que permita guiar el manejo y aprovechamiento de los Residuos Sólidos Orgánicos (RSO) mediante el diseño, operación y mantenimiento de un biodigestor tubular en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan.

2.1. Objetivos específicos

1. Conocer las Normas para el manejo adecuado de los residuos sólidos orgánicos (RSO)
2. Identificar los componentes, materiales y funcionamiento del biodigestor tubular como sistema de aprovechamiento de RSO.
3. Definir el procedimiento de operación segura y eficiente del biodigestor para la producción de biogás y biofertilizantes.
4. Conocer las formas de mantenimiento preventivo y correctivo del sistema.
5. Promover el aprovechamiento de los subproductos obtenidos (biogás y biofertilizantes) dentro del entorno institucional.

3. Marco normativo aplicable

3.1. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)

El principal instrumento jurídico en México a partir del 2003, es La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), que regula la gestión de los residuos, incluyendo los residuos sólidos urbanos y los residuos sólidos orgánicos. Su objetivo es prevenir la generación de residuos, promover su valorización y asegurar un manejo integral que considere aspectos ambientales, económicos y sociales. Esta ley establece que los residuos deben ser manejados de forma que se minimicen sus impactos al ambiente y a la salud humana, fomentando prácticas como la separación en fuente, la reutilización, el reciclaje y el aprovechamiento de residuos orgánicos mediante procesos biológicos, como el compostaje y la digestión anaerobia. Asimismo, promueve la corresponsabilidad entre generadores, autoridades y usuarios finales, impulsando la participación de instituciones educativas en la gestión adecuada de sus residuos.

En el contexto del presente manual, la LGPGIR fundamenta la implementación del biodigestor tubular como una estrategia de valorización de los residuos sólidos orgánicos generados en el TESCH, alineándose con los principios de reducción, reutilización y aprovechamiento establecidos por la legislación mexicana.

3.2. Normas Oficiales Mexicanas relacionadas con RSO y biodigestores

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) constituyen instrumentos técnicos de carácter obligatorio que establecen las especificaciones y procedimientos que deben cumplirse para garantizar la protección ambiental y la salud pública en diversas actividades, incluyendo el manejo de residuos y el aprovechamiento energético.

Entre las principales normas aplicables al manejo de los RSO y a la operación de biodigestores se encuentran:

- **NOM-083-SEMARNAT-2003**, establece las especificaciones de protección ambiental para los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, promoviendo la reducción de residuos enviados a rellenos sanitarios y fomentando su aprovechamiento previo.
- **NOM-052-SEMARNAT-2005**, clasifica los residuos peligrosos, permitiendo identificar que los residuos orgánicos comunes no pertenecen a esta categoría, siempre que no estén contaminados.
- **NOM-001-SEMARNAT-2021**, regula los límites máximos permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales, siendo relevante para evaluar la calidad del biol o efluente líquido generado por el biodigestor.
- **NOM-044-SEMARNAT-2017**, establece límites máximos de emisiones contaminantes para motores que utilizan combustibles alternos, aplicable cuando el biogás es empleado para la generación de energía.

Estas normas proporcionan el marco técnico para garantizar que el aprovechamiento de los RSO mediante biodigestión anaerobia se realice de manera segura y ambientalmente responsable.

3.3. Normativa ambiental aplicable en instituciones educativas

Las instituciones educativas, como el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, están sujetas al cumplimiento de la normativa ambiental federal, estatal y municipal relacionada con la generación y manejo de residuos, así como con la protección del ambiente.

Además de la LGPGIR y las NOM mencionadas, las instituciones educativas deben observar disposiciones derivadas de la **Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)**, que establece los principios para prevenir la contaminación, conservar los ecosistemas y promover el uso sustentable de los recursos naturales.

En este sentido, las escuelas tienen la responsabilidad de implementar programas de separación de residuos, promover la educación ambiental y desarrollar proyectos

sustentables que contribuyan a reducir su huella ambiental. La instalación de un biodigestor en el TESCH se alinea con estos principios, al fomentar el manejo adecuado de los RSO, la producción de energía limpia y la obtención de biofertilizantes para su uso en áreas verdes o huertos escolares.

4. Manejo integral de los residuos sólidos orgánicos (RSO)

El manejo integral de los residuos sólidos orgánicos (RSO) comprende el conjunto de acciones orientadas a su correcta separación, recolección, tratamiento y aprovechamiento, con el objetivo de minimizar su impacto ambiental y maximizar su valorización como recurso. En instituciones educativas, la implementación de estrategias de manejo integral permite reducir la cantidad de residuos enviados a disposición final, fomentar prácticas sustentables y promover la educación ambiental dentro de la comunidad [1].

Entre las principales alternativas de aprovechamiento de los RSO se encuentran el composteo, la lombricomposta y la digestión anaerobia, las cuales permiten transformar la materia orgánica en productos de valor, como mejoradores de suelo, biofertilizantes y energía renovable.

4.1. Aprovechamiento de los RSO mediante compostaje

De acuerdo con la investigación de [5]. El compostaje es la descomposición biológica de sustratos orgánicos, se realiza por una población microbial diversa y en condiciones predominantemente aerobias, generando un material estable, ya que entra en una fase termófila con ello permite que esté libre de patógenos y pueda aplicarse al suelo.

4.2. Aprovechamiento de los RSO mediante lombricomposta

De acuerdo con la investigación de [6]. La lombriz roja californiana *Esenia foetida*, es usada para la elaboración de lombricomposta, generando dos productos como es el lixiviado y humus (sustrato sólido), que es un sustrato que ayuda a mejorar el crecimiento de plantas, gracias a su alto contenido de nutrientes principalmente nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K).

4.3. Aprovechamiento de los RSO mediante Digestión anaerobia.

La digestión anaerobia es un proceso biológico mediante el cual la materia orgánica es descompuesta por microorganismos en ausencia de oxígeno, dando lugar principalmente a la producción de biogás y biofertilizantes. Este proceso ocurre de manera controlada dentro del biodigestor, donde intervienen distintos grupos microbianos que actúan de forma secuencial en etapas como hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis [7].

A través de estas etapas, los compuestos orgánicos complejos presentes en los residuos sólidos orgánicos (RSO), tales como restos de alimentos, estiércoles y residuos agrícolas, son transformados en compuestos más simples, generando como productos finales una mezcla gaseosa rica en metano (biogás), así como un efluente líquido (biol) y un residuo sólido estabilizado (digestato), ambos con potencial como biofertilizantes [8].

5. Biodigestor tubular

El **biodigestor de tipo tubular**, es considerado por criterios técnicos, económicos y operativos, así como su adecuación al contexto institucional del Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan (TESCH).

Este tipo de biodigestor se caracteriza por estar fabricado con materiales plásticos flexibles, lo que permite su fácil adaptación a distintos espacios y condiciones, siendo ampliamente utilizado en proyectos de pequeña escala, rurales y educativos.

5.1. Ventajas y limitaciones del biodigestor tubular

En la Tabla 1 se pueden observar las ventajas y limitaciones del biodigestor tubular.

Tabla 13. Ventajas y Limitaciones del Biodigestor Tubular.

Ventajas	Limitaciones
Económico y accesible	Menor durabilidad
Fácil de transportar e instalar	Vulnerabilidad a daños físicos
Requiere poco mantenimiento.	Limitada capacidad de almacenamiento de biogás, lo que restringe su uso en aplicaciones de gran escala.
Adecuado para proyectos piloto y de investigación	Mayor sensibilidad a cambios de temperatura ambiental
Compatible con residuos orgánicos como restos de alimentos, estiércoles y residuos agrícolas	Requiere monitoreo frecuente para evitar fugas o deformaciones excesivas
Favorece la producción tanto de biogás como de biofertilizante líquido (biol).	

Fuente elaboración propia

5.2. Materiales y equipos para la instalación del biodigestor

2.1.1

5.2.1. Materiales de instalación

Para la construcción y operación del sistema de digestión anaerobia se emplearon materiales de fácil acceso, bajo costo y adecuados para la contención y manejo de residuos orgánicos. La selección de los materiales se realizó considerando criterios de resistencia, hermeticidad y compatibilidad con el proceso anaerobio, con el fin de garantizar un funcionamiento seguro y eficiente del biodigestor. En la Tabla 2. Se pueden observar los materiales de instalación del sistema.

Tabla 14. Materiales de instalación.

Tanque o reactor del biodigestor (capacidad de 20 L, 150 L y 200 L, según el prototipo).
Tubería de PVC para la entrada de carga del sustrato.
Tubería de PVC para la salida del biofertilizante líquido (biol).
Salida inferior para la remoción del biodigestato (lodos).
Mangueras para la conducción del biogás.
Válvulas de control y seguridad.
Conectores, codo, reductores y adaptadores de PVC.
Selladores y materiales para asegurar la hermeticidad del sistema.
Recipientes para el almacenamiento del biofertilizante.
Bolsas tedlar para el almacenamiento y cuantificación del biogás

Fuente elaboración propia

5.2.2. Herramientas

Para la instalación, puesta en marcha y operación del biodigestor fue necesario el uso de diversas herramientas y equipos auxiliares, los cuales permiten realizar de manera adecuada las actividades de perforación, ensamblaje, control de parámetros operativos y verificación del funcionamiento del sistema. Estas herramientas facilitan un montaje seguro y eficiente, así como el monitoreo de variables clave como presión, temperatura y carga del sustrato. A continuación, en la Tabla 3 se observan las principales herramientas empleadas durante el desarrollo del sistema.

Tabla 15. Herramientas y equipo Auxiliar.

Taladro
Desarmador
Bacula para el control de la carga de alimentación
Manómetro
Termómetro digital o sensores para medir la temperatura
Metro

Fuente elaboración propia

En la ilustración 1 se observan las imágenes de las herramientas y del equipo Auxiliar que se ocuparon para la implementación.



Ilustración 26. Herramientas y equipo Auxiliar.

Fuente imágenes tomadas de la web

5.2.3. Equipo de protección personal (EPP)

Considerando que el manejo de residuos sólidos orgánicos, el ensamblaje del biodigestor y su operación implican riesgos físicos, químicos y biológicos, es indispensable el uso de equipo de protección personal adecuado. El EPP permite reducir la probabilidad de accidentes y proteger la integridad del personal durante todas las etapas del proceso, desde la preparación del sustrato hasta la operación y mantenimiento del biodigestor. En la Tabla 4, se presenta el equipo de protección y seguridad recomendado para estas actividades.

Tabla 16. Equipo de protección y seguridad personal (EPP).

Guantes de protección
Lentes de seguridad
Cubrebocas o mascarilla
Bata u overol
Extintor tipo ABC
Botiquín de primeros auxilios

Fuente elaboración propia

6. Montaje del sistema

Seleccionar el tamaño del tanque de polietileno, que se utilizara como Biodigestor.

Realizar los orificios correspondientes a la entrada y salidas del sistema de digestión anaerobia. En este caso, se efectuaron cuatro perforaciones; una de ellas es la entrada para la alimentación, mientras que las tres restantes son para la salida de gas, el bio que corresponde al liquido (Biol) y por último la salida de los lodos (Biodigestato). Los dos últimos corresponde a la producción de mejoradores de suelo.

El primer orificio corresponde a la salida del biogás y se ubicó en la parte central de la tapa del biodigestor, con la finalidad de facilitar la conducción del gas generado durante el proceso de digestión anaerobia. El segundo orificio, también localizado en la tapa del sistema, se destinó a la entrada de carga, a través de la cual se lleva a cabo el proceso de alimentación del biodigestor.

Los dos orificios restantes se realizaron en la parte lateral del reactor. Uno de ellos se destinó a la salida del biofertilizante líquido (biol), mientras que el último corresponde a la salida del biodigestato sólido, permitiendo la remoción de los residuos sólidos generados durante el proceso.



Ilustración 27. Equipo de protección y seguridad personal (EPP).

Fuente imágenes tomadas de la web

En la Ilustración 3 se presenta el procedimiento de montaje del sistema biodigestor, mostrando las actividades realizadas durante su ensamblaje, tales como la adecuación del contenedor, la perforación para la instalación de válvulas y conexiones, así como la preparación del sistema para su posterior operación.



Ilustración 28. Proceso de montaje del biodigestor.

Fuente elaboración propia

Diagrama 1. Procesos del procedimiento para la instalación y montaje del sistema.

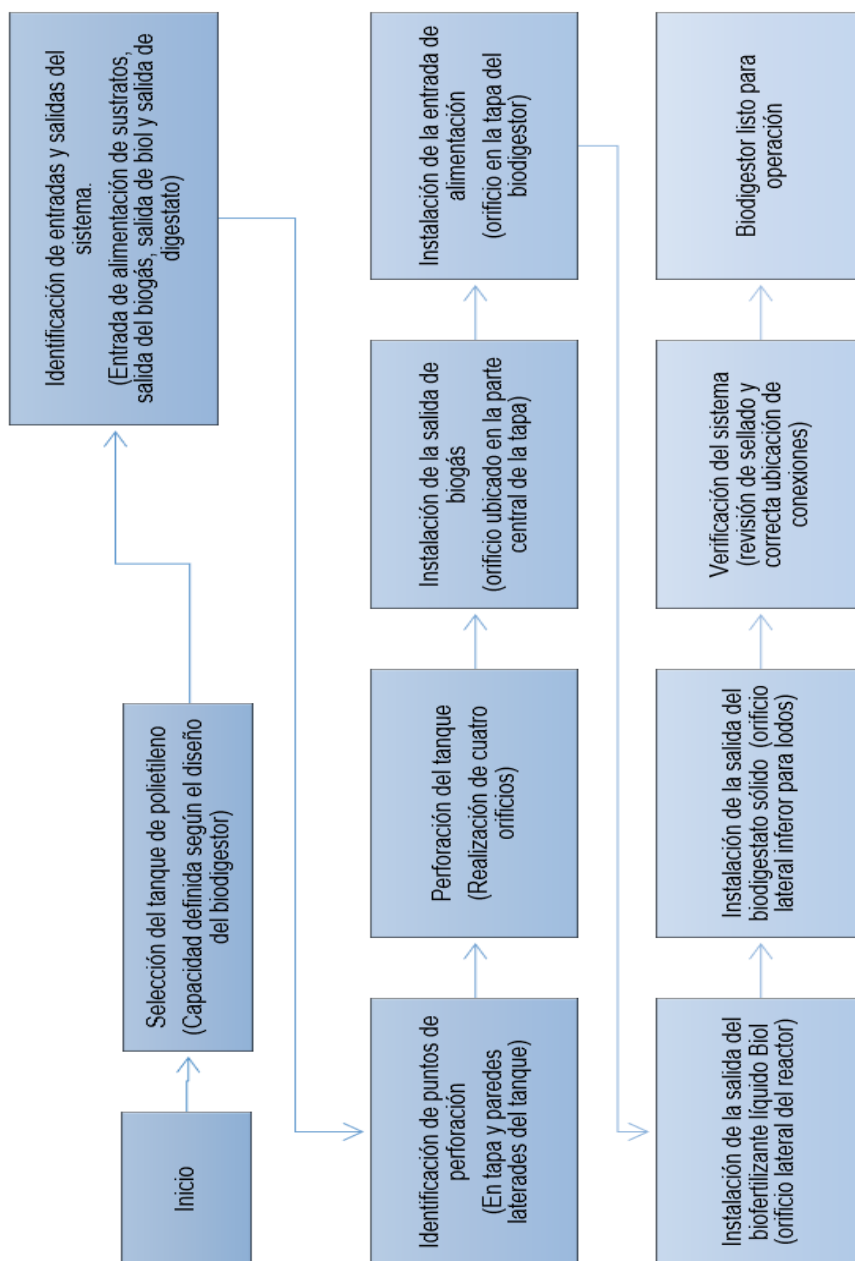


Ilustración 29. Procesos del procedimiento para la instalación y montaje del sistema.

Fuente elaboración propia

7. Selección y clasificación de sustratos.

La selección adecuada de los sustratos constituye una etapa fundamental para garantizar el correcto funcionamiento del biodigestor y la eficiencia del proceso de digestión anaerobia. No todos los residuos generados en las actividades cotidianas son aptos para su incorporación al sistema, por lo que es necesario establecer criterios de clasificación previos a la alimentación.

La correcta clasificación de los sustratos antes de su incorporación al biodigestor reduce riesgos operativos, previene obstrucciones y contribuye a mantener condiciones estables de digestión anaerobia.

En la Ilustración 5, se presentan los sustratos recomendables y sustratos prohibidos para nuestro sistema



Ilustración 30. Sustratos recomendables y sustratos prohibidos.

Fuente Elaboración propia en base a imágenes tomadas de la web

7.1. Preparación del sustrato

La preparación del sustrato consistió en el acondicionamiento previo de los residuos sólidos orgánicos (RSO) antes de su incorporación al biodigestor, con el objetivo de facilitar su degradación biológica y mejorar la eficiencia del proceso de digestión anaerobia. En la Ilustración 6 se presentan algunas de las etapas realizadas durante este proceso.

Como primera etapa, los RSO recolectados pasaron por un proceso de selección, eliminando materiales no orgánicos y reduciendo el tamaño de los residuos mediante corte manual, obteniendo partículas aproximadas de entre 2 y 5 cm. Este procedimiento permitió incrementar la superficie de contacto del sustrato, favoreciendo la actividad microbiana y facilitando su degradación durante la digestión anaerobia.

Posteriormente, los residuos fueron pesados, considerando inicialmente el peso del recipiente o cubeta vacía, con el fin de obtener de manera precisa la masa real de materia orgánica a utilizar. Una vez determinado el peso de los RSO, se procedió a la preparación de la mezcla, manteniendo una proporción de 1:1 entre residuos sólidos orgánicos y agua, con el objetivo de obtener una consistencia homogénea.

La mezcla se realizó manualmente hasta alcanzar una textura semilíquida, similar a la de un “atole”, lo cual facilita el flujo del sustrato dentro del biodigestor y favorece una descomposición más eficiente durante el proceso de digestión anaerobia. Durante las primeras cargas del sistema, y previo al cumplimiento del tiempo de retención hidráulica (TRH), se incorporó estiércol como inóculo biológico, con la finalidad de acelerar el arranque del proceso y promover el desarrollo de la comunidad microbiana. Una vez alcanzado el TRH establecido, la alimentación del biodigestor se realizó únicamente con RSO y agua, sin adición de estiércol, manteniendo condiciones de operación estables.



Ilustración 31. Proceso de preparación del sustrato a partir de residuos sólidos orgánicos (selección, reducción de tamaño y mezcla).

Fuente elaboración propia

Diagrama 2. Procedimiento de la preparación de sustratos.

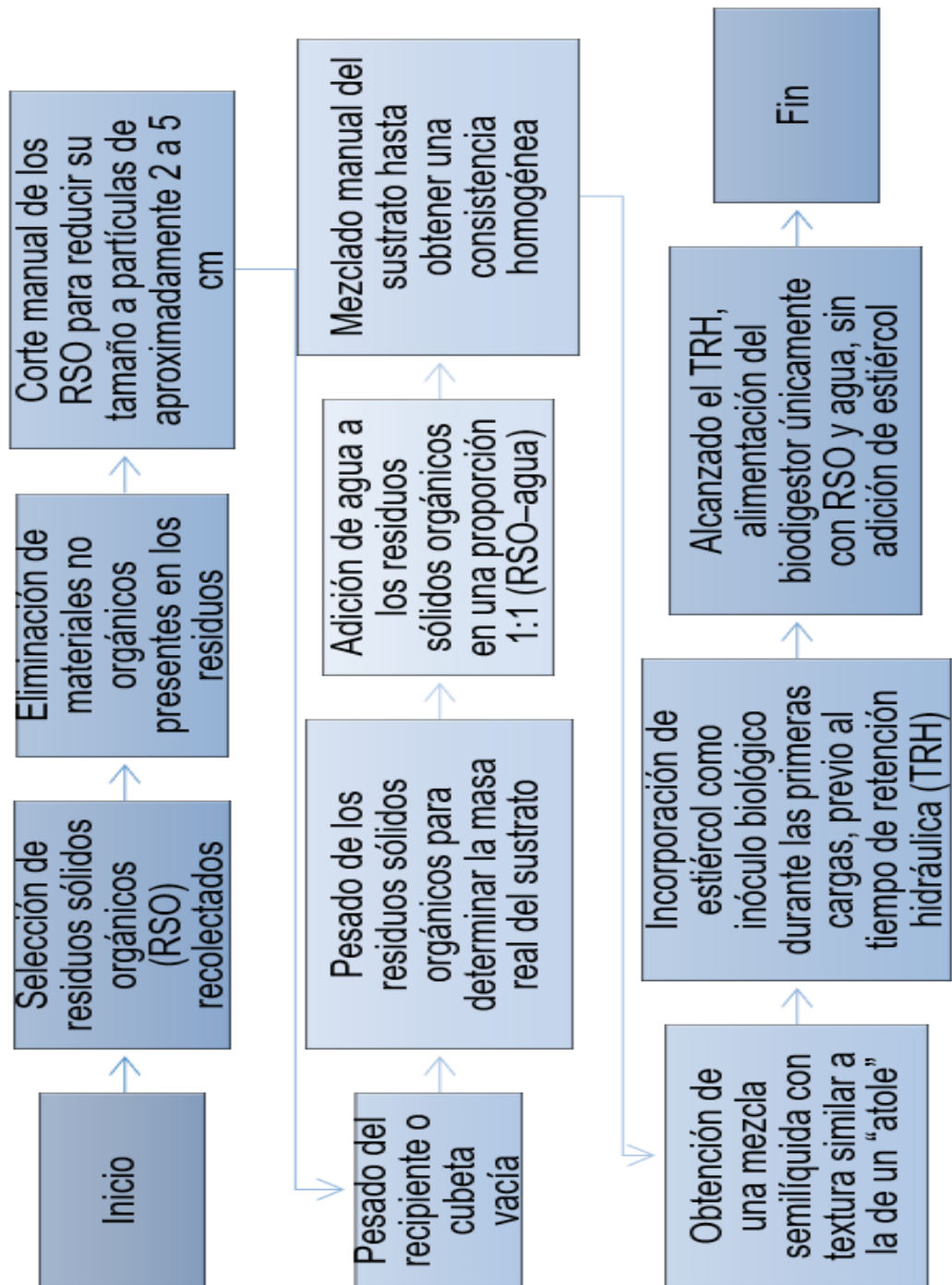


Ilustración 32. Procedimiento de la preparación de sustratos.

Fuente elaboración propia

7.2. Carga Inicial y alimentación del biodigestor

La carga inicial consistió en la introducción del primer volumen de sustrato orgánico previamente preparado en el biodigestor, con el propósito de iniciar el proceso de digestión anaerobia y favorecer el establecimiento de la actividad microbiana dentro del sistema.

Para llevar a cabo este procedimiento, fue necesario realizar un cálculo previo de alimentación, considerando la capacidad total del reactor y el tiempo de retención hidráulica (TRH) del sistema, el cual se estimó entre 60 y 90 días, de acuerdo con las condiciones de operación y el tipo de sustrato utilizado.

Previo a la carga, la materia orgánica pasó por un proceso de secado, con la finalidad de evaluar el contenido de humedad presente en los residuos y determinar de manera más precisa la cantidad real de materia orgánica a alimentar. Este procedimiento permitió establecer una relación adecuada entre sólidos y agua, optimizando las condiciones iniciales del proceso de digestión anaerobia.

Asimismo, se calculó el número de semanas en las que se dividiría la alimentación inicial, con el fin de evitar sobrecargas orgánicas que pudieran afectar el equilibrio microbiológico del biodigestor.

Para determinar el volumen de carga inicial, se consideró dejar aproximadamente un 20 % del volumen total del reactor libre, destinado a la acumulación de biogás. Por ejemplo, en el caso de un biodigestor con capacidad de 200 L, la carga se realizó hasta un máximo de 180 L, garantizando el espacio necesario para la generación y almacenamiento del gas.

Posteriormente, el biodigestor fue alimentado de forma periódica, aproximadamente una vez por semana, utilizando una cantidad menor a la carga inicial y manteniendo una proporción equitativa entre materia orgánica y agua. Durante cada alimentación se realizó simultáneamente el retiro del biol, extrayendo un volumen equivalente al que se introduce, con la finalidad de evitar el sobrellenado del sistema y mantener condiciones de operación estables. Este procedimiento permitió conservar un volumen constante dentro del biodigestor, favoreciendo la continuidad del proceso de digestión anaerobia.

En la Ilustración 8 se muestra el proceso de alimentación del biodigestor, donde se observa la incorporación del sustrato orgánico previamente preparado al sistema.



Ilustración 33. Proceso de alimentación del biodigestor con sustrato orgánico previamente preparado.

Fuente elaboración propia

Diagrama 3. Procedimiento de la carga inicial.

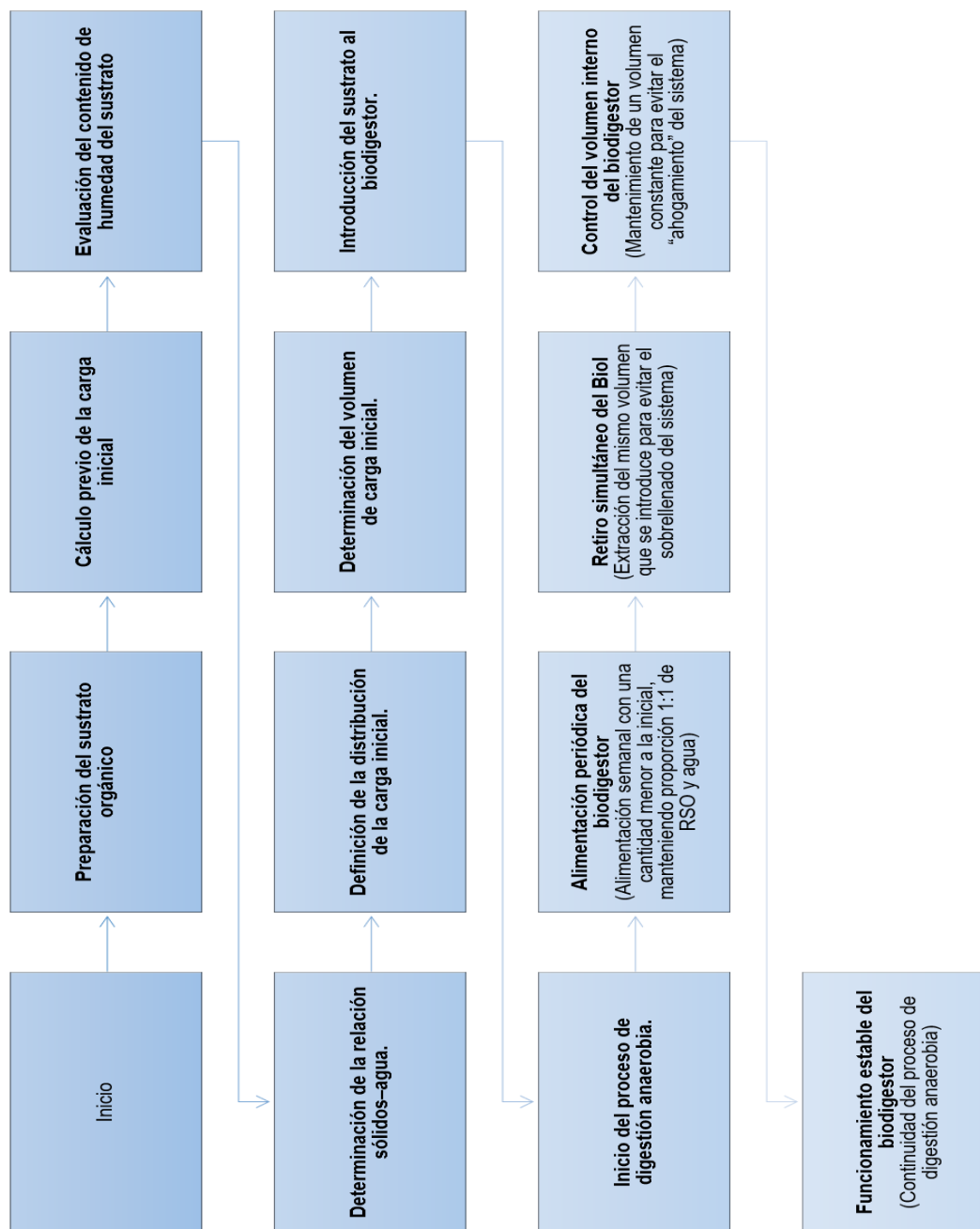


Ilustración 34. Procedimiento de la carga inicial.

Fuente elaboración propia

8. Manejo y uso de producto generados del biodigestor

8.1. Manejo y uso del biogás

El biogás generado durante el proceso de digestión anaerobia fue manejado y almacenado de manera controlada, con el objetivo de evaluar su composición y potencial energético.

Una vez recolectado, el biogás fue transportado a las instalaciones de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) Unidad Cuajimalpa, para su análisis mediante cromatografía de gases, técnica que permitió identificar la composición del gas producido, específicamente los porcentajes de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) presentes durante la digestión anaerobia.

Este análisis resultó fundamental para determinar la calidad del biogás generado, ya que el contenido de metano es el principal indicador de su poder calorífico y potencial aprovechamiento energético. Asimismo, el seguimiento de la composición del biogás permitió evaluar el desempeño del biodigestor y las condiciones del proceso biológico.

En cuanto a su uso, aunque en este proyecto el biogás se destinó principalmente a fines de análisis y caracterización, su composición permite considerar su potencial aplicación futura en sistemas de cocción, calefacción o generación eléctrica a pequeña escala, siempre bajo condiciones controladas de seguridad.

Diagrama 4. Procesos para el manejo y uso del biogás.

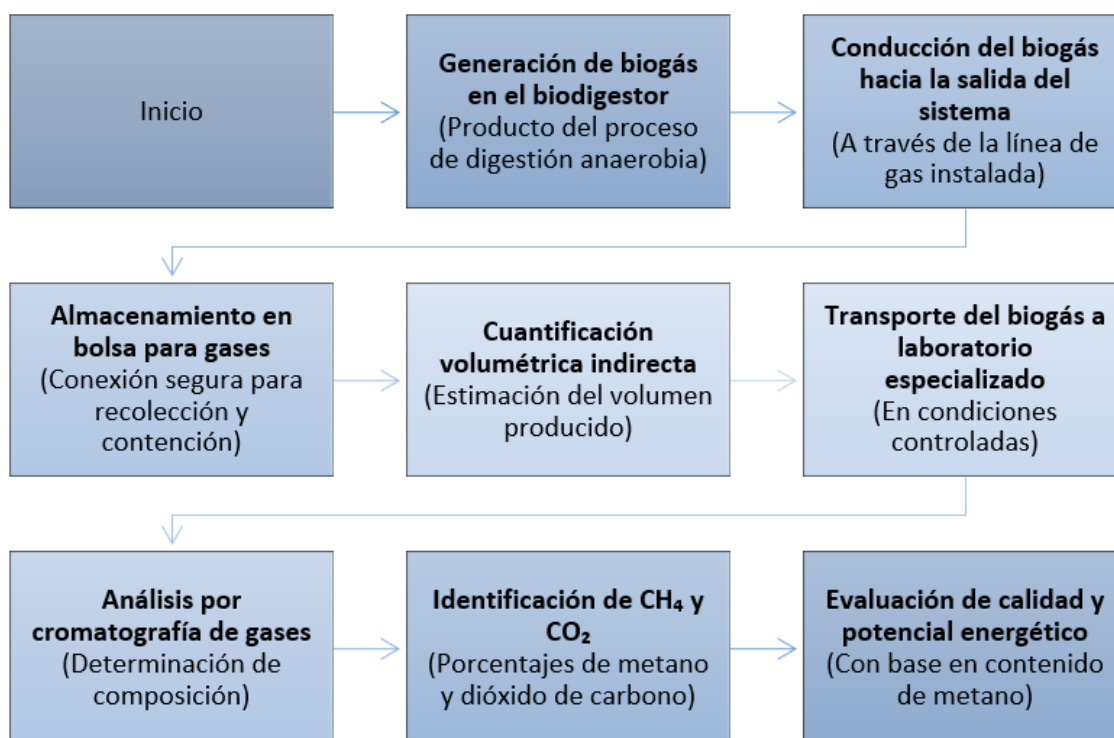


Ilustración 35. Procesos para el manejo y uso del biogás.

Fuente elaboración propia

8.2. Manejo y uso del biol

El biol es el biofertilizante líquido obtenido como subproducto del proceso de digestión anaerobia. Este efluente contiene nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, además de microorganismos benéficos para el suelo.

El biol retirado del biodigestor fue almacenado en recipientes adecuados y aplicado de manera diluida en actividades agrícolas o de jardinería, principalmente como fertilizante foliar o para riego al suelo, contribuyendo a mejorar la fertilidad y estructura del mismo.

Se recomienda su aplicación en horas de baja radiación solar y evitando el contacto directo con hojas sensibles o cultivos recién establecidos.

Diagrama 5. Procesos para el manejo y uso del biol.

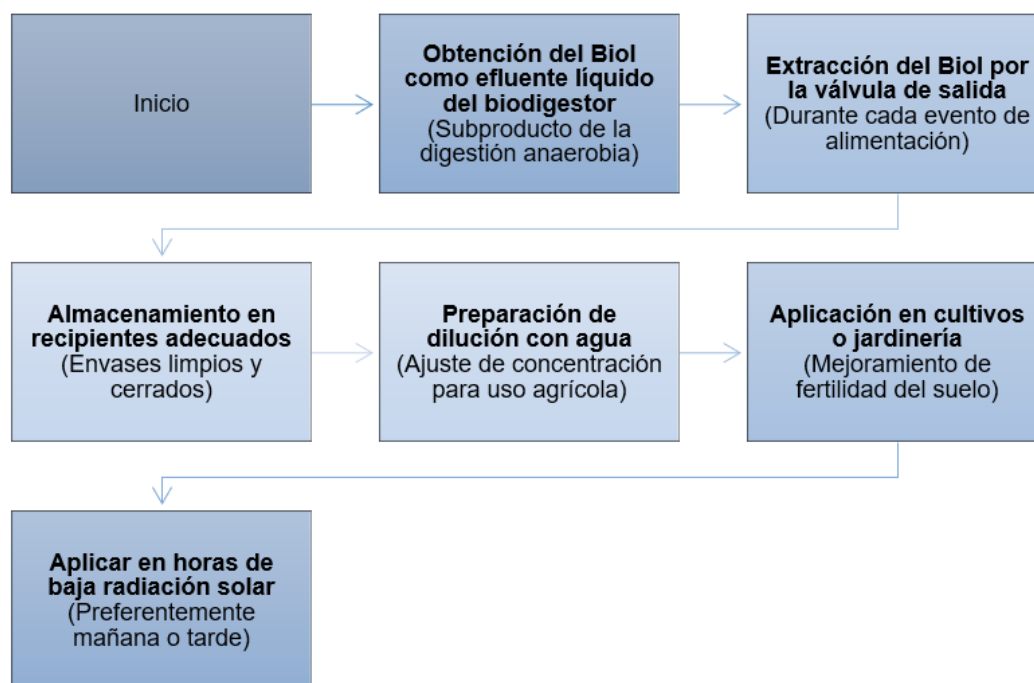


Ilustración 36. Procesos para el manejo y uso del biol.

Fuente elaboración propia

8.3. Manejo y uso del digestato

El digestato corresponde al subproducto sólido generado durante la digestión anaerobia, resultado de la fracción no degradada del sustrato orgánico. Este material posee un alto contenido de materia orgánica estabilizada, por lo que puede utilizarse como mejorador de suelo o acondicionador orgánico.

Diagrama 6. Procesos para el manejo y uso del digestato.

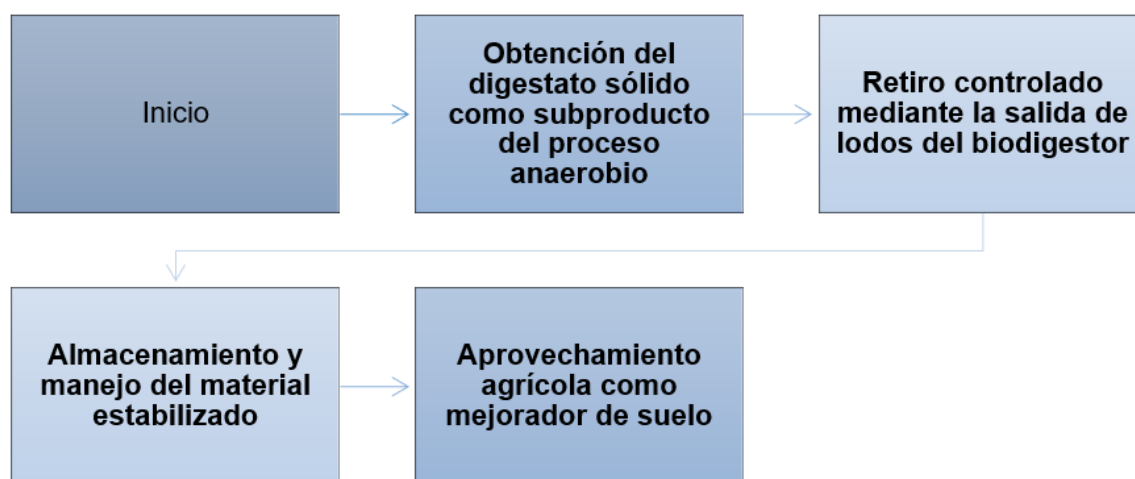


Ilustración 37. Procesos para el manejo y uso del digestato.

Fuente elaboración propia

9. Mantenimiento del sistema

9.1. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo consiste en la revisión periódica del biodigestor con el fin de evitar fallas y prolongar la vida útil del sistema. Incluye la inspección de tuberías, válvulas, conexiones, nivel de biogás, estado del reactor y posibles fugas.

Asimismo, se recomienda limpiar periódicamente las entradas y salidas del sistema y verificar que no existan obstrucciones que afecten la operación.

Para garantizar la operación segura y eficiente del biodigestor, se estableció un procedimiento de mantenimiento preventivo basado en revisiones periódicas de los componentes del sistema. En la ilustración 13 se presenta el diagrama de proceso del mantenimiento preventivo aplicado.

Diagrama 7. Procesos para el mantenimiento preventivo.

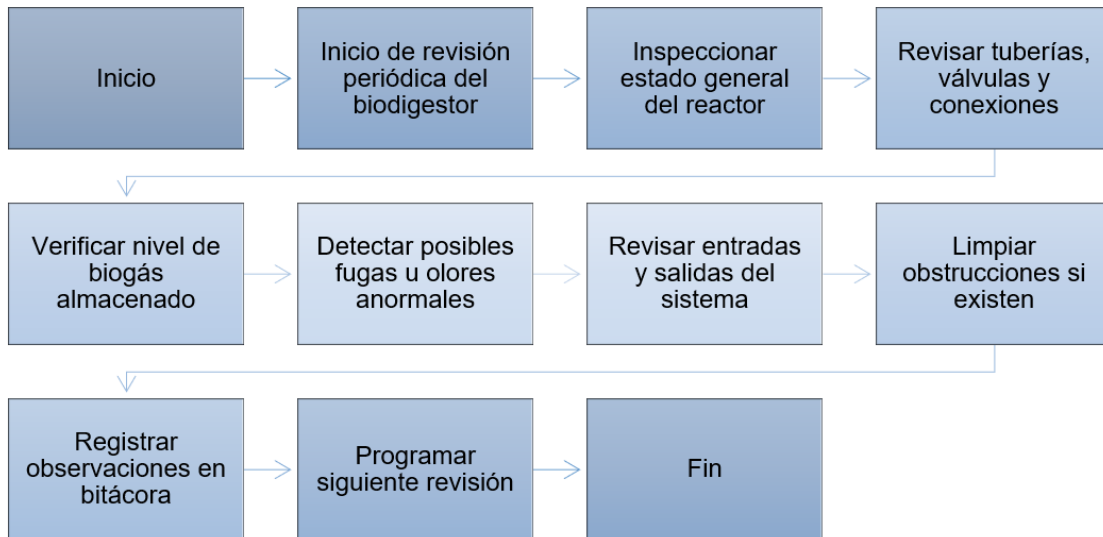


Ilustración 38. Procesos para el mantenimiento preventivo.

Fuente elaboración propia

9.2. Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo se aplica cuando el sistema presenta fallas o anomalías, como disminución en la producción de biogás, fugas, taponamientos o malos olores persistentes.

Este procedimiento permite suspender la alimentación, identificar la causa del problema, aplicar las reparaciones necesarias y restablecer el funcionamiento seguro del sistema. En la Ilustración 14 se presenta la secuencia de acciones para su aplicación.

Diagrama 8. Procesos para el mantenimiento correctivo

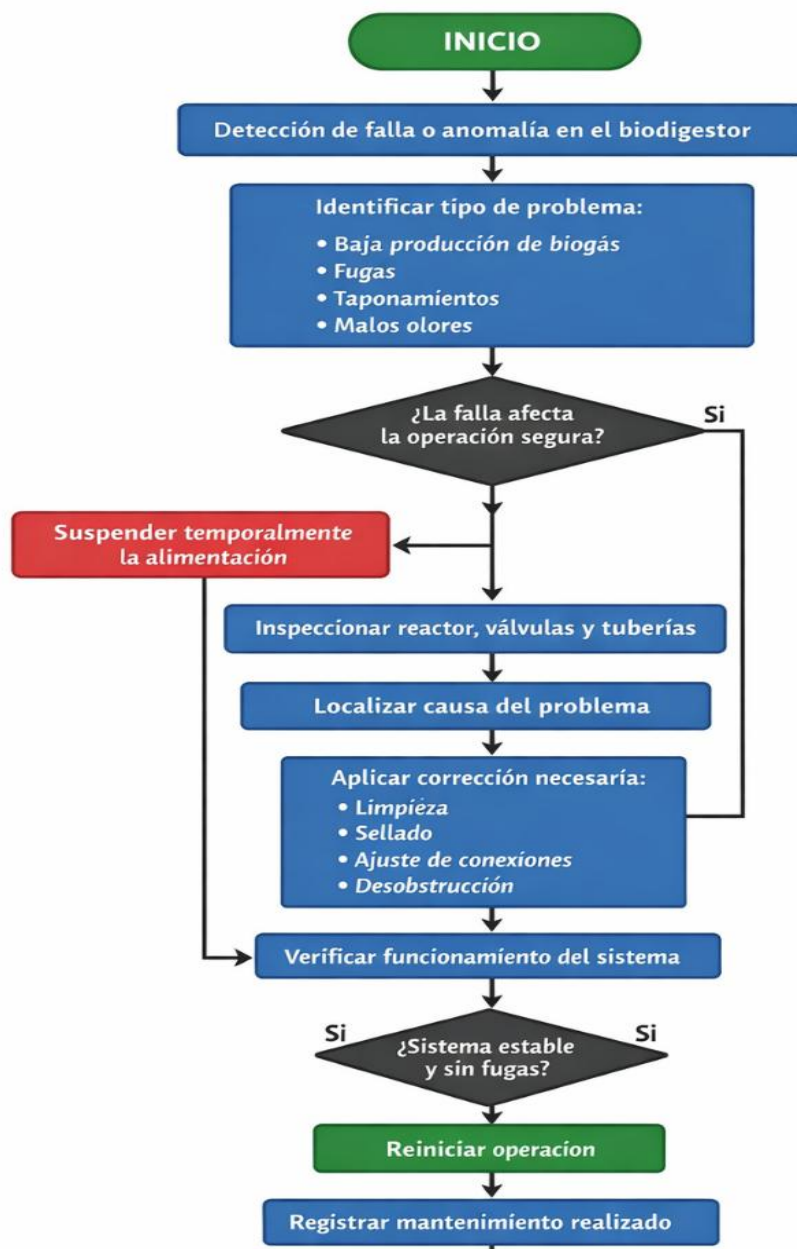


Ilustración 39. Procesos para el mantenimiento correctivo.

Fuente Elaboración propia

9.3. Registro de operación

Llevar un registro de operación permite evaluar el desempeño del biodigestor a lo largo del tiempo y dar seguimiento a las condiciones de funcionamiento del sistema. En este registro se anotan datos relevantes como la fecha de alimentación, tipo y cantidad de sustrato introducido, volumen de agua agregado, volumen de Biol retirado, así como parámetros de control como la temperatura y el pH, además de observaciones relacionadas con la operación del sistema. Este seguimiento facilita la toma de decisiones y permite detectar de manera oportuna posibles desviaciones en el funcionamiento del biodigestor.

Para garantizar un adecuado control operativo, se llevó a cabo un registro periódico de las actividades de alimentación y retiro de Biol. En este seguimiento se documentaron la fecha de carga, el tipo y la cantidad de sustrato incorporado, el volumen de agua agregado, el volumen de Biol retirado, así como los valores de pH, temperatura interna y observaciones relevantes durante la operación. Este registro permitió evaluar la estabilidad del proceso de digestión anaerobia y detectar oportunamente posibles variaciones en el desempeño del biodigestor.

En la Tabla 5, se presenta el formato utilizado para el registro del contenido de sustrato y las condiciones de operación del biodigestor, el cual permitió llevar un control sistemático del monitoreo y seguimiento del sistema durante su funcionamiento.

Tabla 17. Formato de registro de alimentación y monitoreo del biodigestor.

Registro de alimentación y control operativo del biodigestor.						
Fecha	Día	Tipo de sustrato	Cantidad de sustrato (kg)	Agua agregada (L)	Volumen de Biol retirado (L)	Observaciones
	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
	6					
	7					
	8					
	9					
	10					
	11					
	12					
	13					
	14					
	15					
	16					
	17					
	18					
	19					
	20					
	21					
	22					
	23					
	24					
	25					
	26					
	27					
	28					
	29					
	30					

Fuente elaboración propia

El monitoreo de los factores ambientales es fundamental para evaluar las condiciones de operación del biodigestor y garantizar el adecuado desarrollo del proceso de digestión anaerobia.

Entre los parámetros más relevantes se encuentran la temperatura ambiental, la temperatura interna del sistema, el pH, la humedad y la presión, ya que estos influyen directamente en la actividad microbiana y en la eficiencia de producción de biogás. En la Tabla 6, se presenta el formato de registro utilizado para el seguimiento de estos factores ambientales, el cual permitió llevar un control sistemático de las condiciones del sistema durante el periodo de operación del biodigestor.

Tabla 18. registro de monitoreo de factores ambientales del biodigestor.

Fecha	Día	Peso	Presión	Humedad Amb.	Temperatura Amb.	Temperatura Inter.	Ph
	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	6						
	7						
	8						
	9						
	10						
	11						
	12						
	13						
	14						
	15						
	16						
	17						
	18						
	19						
	20						
	21						
	22						
	23						
	24						
	25						
	26						
	27						
	28						
	29						
	30						

Fuente elaboración propia

10. Medidas de seguridad

10.1. Riesgos potenciales

Entre los principales riesgos asociados al uso del biodigestor se encuentran: la acumulación excesiva de biogás, fugas de gas, contacto con residuos orgánicos en descomposición y manejo inadecuado de subproductos.

Estos riesgos pueden minimizarse mediante un diseño adecuado, mantenimiento constante y aplicación de protocolos de seguridad.

10.2. Procedimientos ante fallas

En caso de detectar fallas en el sistema, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Suspender inmediatamente la alimentación.
2. Ventilar el área si existe acumulación de gas.
3. Identificar visualmente posibles fugas o daños.
4. Realizar la reparación correspondiente o notificar al responsable técnico.
5. Reiniciar el sistema únicamente cuando se haya corregido completamente la falla

11. Glosario

Biodigestor: Sistema cerrado herméticamente diseñado para la degradación de residuos orgánicos mediante digestión anaerobia, permitiendo la producción de biogás y biofertilizantes a partir de materia orgánica.

Biogás: Mezcla de gases generados durante la digestión anaerobia, compuesta principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), utilizada como fuente de energía renovable.

Biol: Biofertilizante líquido resultante del proceso de digestión anaerobia, rico en nutrientes solubles que favorecen el crecimiento vegetal.

Digestato: Residuo sólido o semisólido obtenido después de la digestión anaerobia, utilizado como enmienda orgánica para mejorar las propiedades del suelo.

Digestión anaerobia: Proceso biológico en ausencia de oxígeno mediante el cual los microorganismos descomponen materia orgánica produciendo biogás y biofertilizantes.

pH: Medida del nivel de acidez o alcalinidad de un sistema, parámetro crítico para el correcto desarrollo de los microorganismos anaerobios.

Pretratamiento: Conjunto de operaciones previas aplicadas al sustrato, como trituración o licuado, para facilitar su degradación biológica.

Residuos sólidos orgánicos (RSO): Desechos de origen biológico, como restos de comida, residuos vegetales y estiércoles, susceptibles de degradarse de forma natural.

Tiempo de retención hidráulica (TRH): Periodo promedio durante el cual el sustrato permanece dentro del biodigestor para completar su proceso de degradación.

12. Referencias

- [1] SEMARNAT, «Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos,» *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, 2015.
- [2] ONU, «Perspectiva mundial de la gestión de residuos,» *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.*, 2018.
- [3] FAO, «Biogas technology: A training manual for extension.,» *Food and Agriculture Organization of the United Nations.*, 2017.
- [4] J. L. García, «Biodigestores: Diseño, construcción y operación,» *Universidad Nacional Autónoma de México*, 2012.
- [5] E. R. Oviedo-Ocaña, L. F. Marmolejo-Rebellon y Torres-Lozada., «Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo,» *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 2017.
- [6] R. M. E. C. H. Israel, «ELABORACIÓN Y ANÁLISIS DE LOMBRICOMPOSTA PARA SU APROVECHAMIENTO EN ÁREAS ARBOLADAS DE LA ENMSI,» *Verano de la Investigación Científica*, 2018.
- [7] IEA, « Anaerobic digestion of organic wastes: Technology brief. Bioenergy.,» 2018.
- [8] R. P. Kothari, «Different aspects of dry and wet anaerobic digestion: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 968, 2020.