

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Biosistemas

Trabajo Final de Graduación para optar por el grado académico de
Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

DIAGNÓSTICO DEL RENDIMIENTO DE OPERATIVIDAD DE PLANTAS DE DIGESTIÓN
ANAEROBIA EN COSTA RICA

DANIELA ALEJANDRA MORA CORRALES

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
San José, Costa Rica

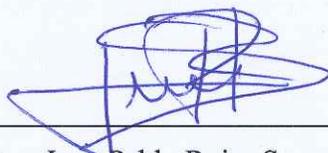
Junio, 2024

Trabajo Final de Graduación sometido a revisión por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería de Biosistemas.



Daniela Alejandra Mora Corrales

Sustentante



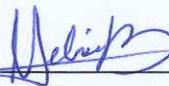
Ing. Juan Pablo Rojas Sossa, M.Sc.

Director del proyecto



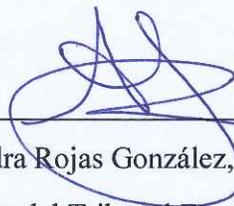
Ing. Mauricio Bustamante Román, Ph.D.

Comité Asesor



Ing. María Melissa Rojas Downing, Ph.D.

Comité Asesor



Alejandra Rojas González, Ph.D.

Presidente del Tribunal Examinador

DEDICATORIA

A Dios por guiar mi camino y a mis padres a quienes debo todo en esta vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por brindarme siempre su amor y apoyo incondicional, a mis padres por educarme con valores y principios, por enseñarme a luchar por mis sueños y a levantarme cuantas veces sean necesarias para continuar. A mi hermano por brindarme su apoyo y estar siempre a mi lado. A mi prometido por acompañarme, brindarme su amor, apoyo incondicional, paciencia y comprensión.

Agradezco a mi comité asesor, por sus colaboraciones y apoyo académico. De manera especial al Ing. Juan Pablo Rojas, director de este trabajo final de graduación, quién fue una guía indispensable en el proceso, su apoyo, disposición y aportes hicieron que los objetivos del proyecto fueran alcanzados con éxito. A la Ing. Melissa Rojas por sus valiosos aportes e ideas, por escucharme y aconsejarme en los momentos difíciles. Al Ing. Mauricio Bustamante por sus comentarios e importantes contribuciones.

A cada una de las personas trabajadoras de las plantas evaluadas, por su tiempo y disposición para que el proyecto fuera realizado de la mejor manera.

Finalmente agradezco a la Universidad de Costa Rica, por brindarme educación superior de calidad y permitirme ser una ingeniera formada en la mejor universidad del país.

RESUMEN

Con el fin de contribuir al avance de la biodigestión en Costa Rica y debido a que es una tecnología con mucho potencial de mejora y crecimiento, se llevó a cabo el presente estudio. A nivel nacional, no se tiene un número exacto de los biodigestores implementados; sin embargo, basado en un estudio realizado por ASOBIOGÁS se estima un aproximado de 500 biodigestores con un alcance de volumen líquido de hasta 63 0000 m³ (IICA, 2023). Estos números se han alcanzado debido a que muchos pequeños y medianos productores del sector agropecuario han considerado la digestión anaeróbica como una opción de alto beneficio para sus sistemas productivos.

El objetivo de este proyecto consistió en elaborar una estrategia para evaluar la eficiencia de revalorización de residuos en plantas de digestión anaerobia y mejorar la implementación de esta tecnología en Costa Rica. Para ello, se evaluaron 4 plantas de digestión anaerobia distribuidas a lo largo del país mediante un diagnóstico de operatividad. Dos de estas plantas son clasificadas de escala mediana y funcionan con desechos bovinos y desechos avícolas. Las plantas restantes son clasificadas como escala industrial y funcionan con desechos de matadero y aguas residuales del proceso de extracción de aceite de palma.

Como parte del proyecto, se desarrolló una herramienta que permite evaluar parámetros críticos en el proceso de producción de biogás, y que determina el nivel de cumplimiento en factores de operatividad, químicos, microbiológicos y de seguridad aplicables al proceso de digestión anaerobia. Esta herramienta permite comprobar el estado de todos los sistemas, equipos y componentes utilizados en el proceso de digestión anaerobia, dado que integra las normas INTE E56:2020, INTE/ISO 20675 e INTE/ISO 22580 con el uso de las pruebas de potencial de biometano (PBM). Asimismo, la herramienta cuenta con la integración de la metodología AMFE como un recurso adicional para detectar la gravedad, frecuencia y detectabilidad de las fallas encontradas con el cumplimiento y no cumplimiento de los criterios evaluados.

Las secciones de la herramienta desarrollada son: 1) información general, 2) instalaciones físicas, 3) caracterización de afluente y efluente, 4) sistema de quema de biogás, 5) sistema de calefacción y mezclado, 6) sistema de tuberías, 7) sistema de filtrado y regulación de presión, 8) sistema de almacenamiento, 9) gestión de seguridad y riesgos, 10) manejo de sustrato y 11) postratamiento. A través de las PBM en las tres visitas realizadas para cada una de las plantas se determinaron parámetros críticos, así como productividad y rendimiento de las materias primas. Con la herramienta que incluye la AMFE se logró poner a prueba la metodología en las 4 plantas para obtener los fallos potenciales de las plantas. Esta integración de los resultados fue utilizada para el desarrollo de un plan de implementación donde se propusieron una serie de acciones correctivas y oportunidades de mejora en los sistemas.

Con este proyecto se determina que las plantas de digestión anaerobia evaluadas enfrentan desafíos significativos. Los principales problemas están relacionados a la operatividad, condiciones inadecuadas de diseño, falta de mantenimiento en equipos y componentes, operación incorrecta de equipos o procesos, y variaciones en la composición o carga del sustrato, permitiendo así que se pierda el control de otros parámetros.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Justificación del proyecto	1
1.2. Delimitación del problema.....	3
1.3. Objetivos	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Digestión anaeróbica y sus fases.....	5
2.2. Parámetros críticos y determinantes para la evaluación del proceso metanogénico	5
2.3. Tipos de biodigestores	6
2.4. Ingeniería del proceso de producción de biogás	7
2.4.1 Recepción y almacenamiento	8
2.4.2 Pretratamiento.....	8
2.4.3 Alimentación	8
2.4.4 Digestión anaeróbica	8
2.4.5 Almacenamiento del digestado y del biogás	8
2.4.6 Postratamiento	9
2.5. Usos y aplicaciones del biogás	9
2.6. Riegos y seguridad en el biogás.....	10
2.7. Problemas en los componentes de biodigestores	11
2.7.1 Fallas en equipos	11
2.7.2 Fugas en el proceso de producción de biogás.....	12
2.7.3 Inhibición del proceso de digestión anaerobia	12
2.7.4 Problemas de mantenimiento.....	12
2.8. Evolución de los diagnósticos en la digestión anaerobia.....	13
2.8.1 Normas INTE E56:2020, INTE/ISO 20675 e INTE/ISO 22580.....	13
2.8.2 Pruebas de potencial de biometano (PBM)	14
2.8.3 Modelo de Gompertz	14
2.8.4 Metodología de análisis modal de fallos y efectos (AMFE)	15
3. METODOLOGÍA.....	16
3.1 Objetivo 1: Desarrollo de la guía de inspección	16
3.1.1 Fase 1: Revisión documental	17
3.1.2 Fase 2: Curación de información.....	17

3.1.3 Fase 3: Diseño y elaboración de la herramienta	18
3.2 Objetivo 2: Diagnóstico	20
3.2.1 Elección de las plantas de digestión anaerobia.....	20
3.2.2 Selección de puntos de muestreo	21
3.2.3 Recolección de datos y toma de muestras	22
3.2.4 Caracterización y análisis fisicoquímico de afluentes y efluentes	22
3.2.4.1 Demanda química de oxígeno (DQO) y pH	22
3.2.4.2 Sólidos totales y volátiles	23
3.2.4.3 Parametrización de producción de metano de diferentes materias primas	24
3.2.5 Medición de calidad de biogás en planta.....	26
3.2.6 Desarrollo de la metodología de análisis modal de fallos y efectos (AMFE)	27
3.3 Objetivo 3: Plan de implementación.....	29
4. RESULTADOS	29
4.1 Diseño de la guía de inspección.....	29
4.2 Evaluación diagnóstica en las plantas de digestión anaerobia.....	34
4.2.1 Contexto de las plantas de digestión anaerobia.....	35
4.2.1.1 Industria cárnica	35
4.2.1.2 Industria palma aceitera.....	36
4.2.1.3 Industria vacuna.....	37
4.2.1.4 Industria avícola	38
4.2.1.5 Caracterización de entradas y salidas para plantas en estudio.....	39
4.2.2 Ensayos de laboratorio	42
4.2.2.1 Industria cárnica	42
4.2.2.2 Industria palma aceitera.....	43
4.2.2.3 Parametrización de productividad en plantas de escala industrial	44
4.2.2.4 Industria vacuna	45
4.2.2.5 Industria avícola	47
4.2.2.6 Parametrización de productividad en plantas de escala mediana	49
4.2.3 Inspección de las plantas	49
4.2.3.1 Industria cárnica	50
4.2.3.2 Industria palma aceitera.....	51
4.2.3.3 Industria vacuna.....	54

4.2.3.4	Industria avícola	55
4.2.4.5	Distribución de criterios en mapas de calor.....	57
4.2.4.6	Aplicación de metodología AMFE.....	58
4.3	Plan de implementación y recomendaciones	62
5	CONCLUSIONES.....	69
6	RECOMENDACIONES	70
7	REFERENCIAS	71
8	ANEXOS.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones de temperatura y pH para las etapas de biodigestión.....	6
Tabla 2. Necesidad de eliminación de gases presentes en el biogás.....	9
Tabla 3. Comparación de características del biogás y otros gases.....	10
Tabla 4. Fuentes consultadas para definir parámetros críticos del proceso de biodigestión.	18
Tabla 5. Filtro inicial para selección de plantas de digestión anaerobia.....	20
Tabla 6. Datos sobre categorías de selección para plantas de digestión anaerobia	20
Tabla 7. Clasificación para la gravedad de la falla y su valor asociado.	27
Tabla 8. Clasificación para la frecuencia de la falla y su valor asociado.	27
Tabla 9. Clasificación para la detectabilidad de la falla y su valor asociado.....	28
Tabla 10. Diagrama de calor basado en los resultados de la metodología AMFE.	34
Tabla 11. Caracterización promedio de muestras frescas para las plantas en estudio.	39
Tabla 12. Datos de DQO para muestras frescas de las plantas estudiadas.	41
Tabla 13. Caracterización promedio de ST, SV y pH por visita para PBM realizados a planta de industria cárnica.	42
Tabla 14. Caracterización promedio de ST, SV y pH por visita para PBM realizados a planta de industria de palma aceitera.....	43
Tabla 15. Parámetros cinéticos de ajuste del modelo de Gompertz para los PBM en las plantas de escala industrial.....	45
Tabla 16. Caracterización promedio de ST, SV y pH por visita para PBM realizados a planta de industria vacuna.	46
Tabla 17. Caracterización promedio de ST, SV y pH por visita para PBM realizados a planta de industria avícola.	47
Tabla 18. Parámetros cinéticos de ajuste del modelo de Gompertz para PBM en las plantas de escala mediana.	49
Tabla 19. Composición promedio del biogás para la industria cárnica.	51
Tabla 20. Composición promedio del biogás para la industria palma aceitera.	53
Tabla 21. Composición del biogás para la industria vacuna.....	55
Tabla 22. Composición del biogás para la industria avícola.....	56
Tabla 23. Modos de falla para la producción de biogás en planta de industria vacuna.	59
Tabla 24. Modos de falla para la producción de biogás en planta de industria vacuna. Continuación.	60
Tabla 25. Modos de falla para la producción de biogás en planta de industria avícola.....	60
Tabla 26. Modos de falla para la producción de biogás en planta de industria avícola Continuación.....	61
Tabla 27. Modos de falla para la producción de biogás en planta de industria palma Aceitera. .	61
Tabla 28. Modos de falla para la producción de biogás en planta de industria cárnica.....	62
Tabla 29. Acciones correctivas para industria vacuna.	64
Tabla 30. Acciones correctivas para industria palma aceitera.	65
Tabla 31. Acciones correctivas para industria cárnica.....	66
Tabla 32. Acciones correctivas para industria avícola.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo utilizado en plantas de digestión anaerobia con fines energéticos. ..	7
Figura 2. Aplicaciones del biogás y sus tratamientos. Adaptado de Abello (2018).	10
Figura 3. Explosión en reservorio de biogás en una planta de digestión anaerobia costarricense. (Sánchez, 2024).	11
Figura 4. Procedimiento de aplicación de la AMFE. Adaptado de Castillo y Michalus (2023). ..	16
Figura 5. Fases metodológicas para desarrollo de la guía de inspección.	17
Figura 6. División de información y secciones en la herramienta.	19
Figura 7. Plantas seleccionadas y sus tipos de sustratos.	21
Figura 8. Tubos de ensayo para pruebas de DQO después de salir del horno.	23
Figura 9. Biorreactor tipo batch utilizado en el laboratorio.	24
Figura 10. Biorreactores en condiciones contraladas dentro de incubadora.	25
Figura 11. Medidor de gases Multitec 545.	26
Figura 12. Proceso utilizado para el desarrollo de la metodología AMFE.	28
Figura 13. Procedimiento para desarrollar plan de implementación.	29
Figura 14. Esquema de división de resultados según los objetivos propuestos.	29
Figura 15. Estructura de menú principal.	30
Figura 16. Interfaz visual en sección uno de la herramienta desarrollada.	32
Figura 17. Ejemplo de gráficas de cumplimiento y nivel de gravedad.	33
Figura 18. Matriz de metodología AMFE antes de acciones correctivas.	34
Figura 19. Matriz de metodología AMFE después de acciones correctivas.	34
Figura 20. Modelo de aprovechamiento de desechos por medio de diagnóstico operativo.	35
Figura 21. Planta de digestión anaerobia de la industria cárnica.	36
Figura 22. Planta de digestión anaerobia de la industria de palma aceitera.	37
Figura 23. Planta de digestión anaerobia de la industria vacuna.	38
Figura 24. Planta de digestión anaerobia de la industria avícola.	39
Figura 25. Datos de productividad de biogás y modelación de Gompertz para industria cárnica.	43
Figura 26. Datos de productividad de biogás y modelación de Gompertz para industria de palma aceitera.	44
Figura 27. Datos de productividad de biogás y modelación de Gompertz para industria vacuna.	47
Figura 28. Datos de productividad de biogás y modelación de Gompertz para industria avícola.	48
Figura 29. Nivel de cumplimiento por sección para planta industria cárnica.	50
Figura 30. Nivel de cumplimiento por sección para planta industria palma aceitera.	52
Figura 31. Nivel de cumplimiento por sección para planta industria vacuna.	54
Figura 32. Nivel de cumplimiento por sección para planta industria avícola.	56
Figura 33. Mapas de calor para las plantas en estudio. (a) Industria Vacuna, (b) Industria Avícola, (c) Industria Cárnica, (d) Industria Palma aceitera.	58
Figura 34. Diagrama Ishikawa implementado en la metodología AMFE de la herramienta.	58
Figura 35. Secciones que muestran fallas potenciales en las plantas estudiadas.	59
Figura 36. Diagrama de proceso para la gestión eficiente de producción de biogás.	63

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Parámetro	Abreviatura
Acidez	pH
Demanda química de oxígeno	DQO
Sólidos totales	ST
Sólidos volátiles	SV
Número de prioridad de riesgo	NPR
Análisis modal de fallos y efectos	AMFE
Pruebas de potencial de biometano	PBM
Relación carbono y nitrógeno	C/N
Ácido sulfhídrico	H ₂ S
Metano	CH ₄
Tiempo de retención hidráulico	TRH
Tiempo de retención de sólidos	TRS
Temperatura	T

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación del proyecto

Los biodigestores tienen sus primeras apariciones en el año 1890 en la India donde se construyó uno por primera vez a escala real. Para esas épocas su materia prima comprendía el estiércol de animales y desechos vegetales; su construcción fue impulsada principalmente por la escasez energética de campesinos en las épocas de invierno. En Inglaterra alrededor de 1896 se utilizó el biogás producido para generar energía para el alumbrado público, utilizando los lodos de cloacas de la ciudad como sustrato (Wang et al., 2016).

En Alemania para 1920 se pone en marcha el primer digestor del país, el cual va a generar gran difusión de esta tecnología a nivel europeo y mundial (PROSAP, 2009). En China para el año 1930, se implementa por primera vez un biodigestor, acudiendo a la necesidad sanitaria y eléctrica de las zonas rurales. Luego en India y Sudáfrica debido a la escasez económica para el año 1950 se difundieron estos métodos de digestión anaeróbica, lo que permite que estos países cuenten con gran cantidad de biodigestores en funcionamiento óptimo (Velazquez, 2016).

En Costa Rica no se conoce claramente de las primeras apariciones de esta tecnología; sin embargo, se tiene conocimiento de que José Gabriel Castillo Araya en 1970 empieza a implementar los primeros sistemas anaeróbicos en el país (Araya, 2015). Luego de esto la Universidad EARTH en sus programas de tecnología logra difundir en 1990 la idea de implementar biodigestores (Botero y Preston, 1987).

A nivel nacional, no se tiene un número exacto de los biodigestores implementados, pero muchos pequeños y medianos productores del sector agropecuario lo han empezado a considerar una opción de alto beneficio. Basado en un estudio realizado por ASOBIOGÁS se estima un aproximado de 500 biodigestores distribuidos a nivel nacional con un alcance de volumen líquido de hasta 63 0000 m³ (IICA, 2023).

Costa Rica al ser un país con gran actividad agropecuaria, posee un fuerte potencial de aprovechamiento de desechos como materia prima para los biodigestores (Viquez, 2017). La producción agrícola abarca más de medio millón de hectáreas, lo que representa aproximadamente el 10% del territorio nacional y los cultivos predominantes incluyen café, arroz, caña de azúcar, palma aceitera, piña y banano (Flores, 2014). Debido a esto, la digestión anaerobia se ha considerado como una potencial alternativa para disminuir la emisión de gases de efecto invernadero en la agroindustria. Se ha demostrado que en operaciones no controladas los desechos pueden generar hasta 25 veces más impacto comparado con los sistemas controlados. De modo que la digestión anaerobia al ser un sistema controlado de cosecha de desechos permite capturar el metano producido durante procesos de descomposición y así convertirlo en gas metano aprovechable (Viquez, 2017).

Para las tecnologías de digestión anaerobia, se consideran modelos de digestores según su tamaño, tipo de sustrato y uso del biogás, siendo el modelo de biodigestor Taiwanés el más utilizado, en número de unidades, en países en desarrollo, incluido Costa Rica. Esto porque es un modelo que permite ser desarrollado a un bajo costo y que se ha adaptado de mejor manera en las zonas tropicales, ya que no ha presentado problemas de construcción como los modelos de la India y China (Usack et al., 2014). Asimismo, a pesar de ser el biodigestor Taiwanés el más utilizado, se han desarrollado también a nivel país lagunas cubiertas de polietileno de alta densidad,

biodigestores convencionales prefabricados, reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB) y biodigestores de mezcla continua (CSTR) (IICA, 2023).

Además, el uso de biodigestores ha empezado a tomar valor para los programas de descarbonización en diferentes países, incluido Costa Rica. La producción de biogás aporta significativamente la disminución de uso de combustibles fósiles, debido a que se logran reemplazar por energía eléctrica y calórica renovables. Asimismo, se procesan residuos orgánicos que pueden contribuir a las emisiones de gases de efecto invernadero y se fomentan las prácticas de agricultura sostenible al reducir la necesidad de fertilizantes químicos (Jiménez F. , 2018).

Para Costa Rica, el Plan de Descarbonización incluye cuatro ejes relacionados con el desarrollo agropecuario. El primer eje se centra en: la transformación del sector industrial mediante procesos y tecnologías que utilicen energía de fuentes renovables o eficientes y sostenibles con emisiones bajas o nulas. El segundo eje en el desarrollo de sistemas de gestión integrada de residuos que se base en la separación, reutilización, revalorización y disposición final con máxima eficiencia y emisiones reducidas de gases de efecto invernadero. El tercer eje en la promoción de sistemas agroalimentarios altamente eficientes que produzcan bienes para exportación y consumo local con bajas emisiones de carbono. Finalmente, el cuarto eje en la consolidación de un modelo ganadero eco-competitivo centrado en la eficiencia productiva y la reducción de gases de efecto invernadero (Gobierno de Costa Rica, 2019).

A pesar de que existen estas iniciativas que promueven la generación de energía con fuentes renovables, la digestión anaerobia en Costa Rica mantiene continuos retos, asociados a la falta de monitoreo y mantenimiento de sistemas, diseño de las plantas y falta de conocimiento del proceso (Salazar y Cortes, 2019). Por lo que, es de gran importancia evaluar el estado de esta tecnología en el país para poder mejorar sus condiciones de funcionamiento. Actualmente el Costa Rica no cuenta con un sistema de evaluación de plantas de digestión anaerobia. Varias instituciones intentan individualmente abarcar la problemática desde sus posibilidades, un ejemplo de ello es la investigación académica desarrollada por las universidades públicas del país. Sin embargo, nadie ha desarrollado hasta el momento una estrategia que contemple el sistema biológico y el sistema mecánico que poseen las plantas de digestión anaerobia. De modo que, el desarrollo de una herramienta que permita diagnosticar plantas de digestión anaerobia desde su sistema biológico y su sistema mecánico se encuentra como una factible solución para asegurar que operan de manera correcta, eficiente y segura (Vergara, 2017).

La herramienta de diagnóstico puede llegar a ser de gran utilidad para operadores de las plantas, vendedores y diseñadores de sistemas de digestión anaerobia. Por lo que se puede divulgar por medio de las páginas web de las empresas y plantas que serán parte del proceso de recolección de datos, además se puede distribuir por medio de capacitaciones para las personas interesadas en el tema.

El desarrollo de este diagnóstico permitirá un mayor aprovechamiento de la tecnología en el país, al identificar áreas de mejora y recomendaciones para optimizar el rendimiento y la eficiencia de las plantas de digestión anaerobia. Adicionalmente, tiene el propósito de maximizar la producción de biogás, minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero y garantizar una operación segura y sostenible. Es importante mencionar que este proyecto de graduación se encuentra vinculado con varios de los Objetivos del Desarrollo Sostenible que son el número 7 Energía

asequible y no contaminante y el número 13 Acción por el Clima. Estas relaciones se establecen por ser un sistema de generación de energía limpia y renovable, además ayuda en contra del cambio climático, principalmente por la disminución de gases de efecto invernadero. Asimismo, se permite promover oportunidades de aprendizaje de calidad (INEC, 2021).

1.2. Delimitación del problema

El potencial de producción de metano para el año 2017 en Costa Rica se registró como 377 000 000 m³ anuales, lo cual es equivalente a una producción diaria mayor a 1 000 000 m³. En términos de consumo eléctrico este nivel de producción puede suplir hasta un 5% de la necesidad eléctrica del país (IICA, 2023).

A pesar de ser una tecnología con gran potencial, se han desarrollado retos para la adopción de la biodigestión a nivel nacional, principalmente por la falta de capacidades en el desarrollo de los proyectos. Con regularidad, se instalan biodigestores, pero luego no se vuelve a visitar el sitio, descuidando el acompañamiento necesario para que los usuarios se apropien del sistema y puedan operarlo adecuadamente. Sin embargo, esta situación puede resolverse al desarrollar capacidades para la instalación, operación, mantenimiento y reparación de los biodigestores (RedBioLAC, 2016).

Dada la situación actual de la biodigestión a nivel país, el presente trabajo final de graduación consistió en elaborar una herramienta que permitiera diagnosticar el funcionamiento operativo y la eficiencia de producción de biogás en plantas de digestión anaerobia, la cual debe brindar la confiabilidad de los sistemas, y garantizar que se desarrollen operaciones seguras y de calidad adecuada para los funcionarios.

Para esto se ejecutó un diagnóstico por medio de una herramienta que recopila la información necesaria para poder conocer el estado de una planta. De este modo, se determinaron los puntos que se deben cambiar y mejorar en los sistemas mecánicos y biológicos a lo largo del proceso de producción de biogás.

Para el desarrollo de esta herramienta se utilizó la investigación científica, abordada desde estudios previos, recopilación de información existente y las normas vigentes a nivel nacional INTE E56:2020, INTE/ISO 20675:2019, INTE/ISO 22580:2020 para definir los parámetros físicos, químicos, microbiológicos y técnico-operativos involucrados en las plantas de biodigestión anaerobia.

Este abordaje permitió incluir el sistema biológico y mecánico existentes en las plantas de digestión anaerobia. Asimismo, esta herramienta puede ser utilizada para el monitoreo de plantas existentes y utilizarse como una base para el diseño de nuevas plantas, ya que los criterios incluidos a lo largo de la herramienta permiten tomar mejores y más acertadas decisiones en el diseño. Además, esta herramienta contempló involucrar mantenimientos correctivos y preventivos como método de mejoramiento de las condiciones en las plantas de digestión anaerobia.

1.3. Objetivos

- **Objetivo general:**

Elaborar una estrategia para evaluar la eficiencia de revalorización de residuos en plantas de digestión anaerobia y mejorar la implementación de esta tecnología en Costa Rica.

- **Objetivos específicos:**

1. Desarrollar una metodología de guía de inspección que permita determinar el rendimiento en producción de biogás y reducción de carga orgánica de dos tipos de plantas de biogás implementadas en Costa Rica
2. Realizar un diagnóstico integral del proceso de digestión anaerobia en dos tipos de plantas de biogás, para identificar las causas que han impactado la eficiencia de revalorización de residuos en esta tecnología.
3. Preparar un plan de implementación basado en el diagnóstico que sugiera acciones correctivas o procesos de mejora continua en las operaciones unitarias de las plantas de biogás.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Digestión anaeróbica y sus fases

El proceso de digestión anaerobia sucede a través de transformaciones bioquímicas, en las cuales ocurren una serie de reacciones metabólicas que permiten a los microorganismos degradar la materia prima. De este proceso se obtienen en mayor cantidad dos gases como productos que son metano y dióxido de carbono. La digestión anaerobia se divide en cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Echeverría y Chamorro, 2018).

En la primera fase ocurren paralelamente por medio de enzimas hidrolíticas tres cambios principales, de manera que los carbohidratos se convierten en monosacáridos, los lípidos en ácidos grasos de cadena larga y las proteínas se convierten en aminoácidos (Tamayo y Torres, 2018). En la segunda fase dos grupos de bacterias de origen acidogénicas se encargan de la degradación de monosacáridos y aminoácidos para formar una mezcla de hidrógeno, dióxido de carbono y ácidos orgánicos (Aguilera, 2019).

En la tercera fase se da la metabolización de ácidos orgánicos, de lo cual se obtiene acetato de hidrógeno, esto por medio de bacterias acetogénicas (Allendes, 2016). En la cuarta fase y última, metanogénesis, se da la producción de metano debido a la acción de los microorganismos como las arqueas, de origen metanogénico (Allendes, 2016).

2.2. Parámetros críticos y determinantes para la evaluación del proceso metanogénico

La digestión anaerobia es un proceso biológico complejo, por lo que se debe contar con las condiciones necesarias y óptimas en los sistemas. Estas condiciones son afectadas por diferentes parámetros críticos como la materia prima, la relación C/N, el porcentaje de humedad, el pH y la temperatura.

El primer parámetro crítico es la materia prima orgánica para el proceso de digestión anaerobia, que puede ser de origen animal o vegetal, y de fuente de origen agroindustrial, doméstico o forestal. Estos residuos deben presentar las características bioquímicas necesarias para que la fermentación metanogénica sea exitosa, es decir, que la producción de metano se encuentre entre el 60-70 % (Allendes, 2016). Además, debe tener un adecuado equilibrio de sales como: níquel, cobalto, zinc, selenio, manganeso, potasio, calcio y otros en menores cantidades, que aumentan la conductividad eléctrica facilitando la transferencia de electrones que permiten el crecimiento microbiano (FAO, 2019).

Otro de los parámetros que puede llegar a desestabilizar el proceso de producción de biogás es la relación C/N, debido a que el nitrógeno tiene importantes funciones dentro de la digestión anaerobia como la síntesis de proteínas, equilibrio nutricional y amortiguación en el pH. Por otro lado, el carbono aporta energía al proceso y es esencial para la producción de biogás, dado que sus principales componentes son el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂). Una relación óptima de C/N está en el rango de 20:1 a 30:1 (Aguilera, 2019).

Adicionalmente, la humedad tiene un papel importante en la generación de biogás como parámetro crítico. El rango ideal de humedad en la materia orgánica para la digestión anaerobia suele estar entre el 50 y el 70 %, dando condiciones óptimas para el crecimiento y la actividad de los

microorganismos responsables de la digestión. Una humedad demasiado baja puede ralentizar el proceso de digestión al reducir la actividad microbiana (Colmenares y Santos, 2007).

Parámetros como el pH y la temperatura afectan directamente el proceso productivo de la digestión anaerobia. El pH debe oscilar entre rangos de 6,5 a 7,5 para que la actividad enzimática sea la adecuada. Este parámetro se ve altamente relacionado con las sustancias inhibidoras en la etapa metanogénica (Arias, 2018).

A nivel de temperaturas existen tres digestiones distintas según su rango de operación: la psicrófila, mesófila y termófila. En la psicrófila el rango mínimo oscila entre 4-10 °C, el óptimo 15-18 °C y el máximo 20-25 °C, todos estos para un tiempo de fermentación superior a los 100 días. Para la mesófila el rango mínimo se encuentra entre 15-20 °C, el óptimo entre 25-35 °C y el máximo 35-45 °C, con un tiempo de fermentación de 30 a 60 días. Para el rango termófilico las temperaturas van de 25-45 °C, el óptimo de 50-60 °C y el máximo de 75-80 °C, con un tiempo de 10 a 15 días de fermentación (Allendes, 2016).

La temperatura tiene un efecto inversamente proporcional en el tiempo de retención hidráulico (TRH) del biodigestor, es decir, mientras la temperatura sea mayor el TRH es menor. Este comportamiento se debe al aumento en el metabolismo microbiano, ya que temperaturas más altas favorecen el aumento en la tasa de crecimiento microbiano y a la reproducción de microorganismo anaerobios (Allendes, 2016).

En la Tabla 1 se muestran las condiciones para las diferentes etapas del proceso de digestión anaerobia.

Tabla 1. Condiciones de temperatura y pH para las etapas de biodigestión. Adaptado de Abello (2018)

Parámetro	Hidrólisis y Acidogénesis	Acetogénesis	Metanogénesis
Temperatura (°C)	30 - 40	30 - 40	35 - 40
pH	5,5 - 6,5	6,0 - 7,0	6,5 - 7,5

2.3. Tipos de biodigestores

Como se presentó en la sección 2.1, la digestión anaerobia se desarrolla en cuatro fases, que pueden ocurrir secuencialmente en el mismo volumen de materia o pueden ocurrir en diferentes zonas del biodigestor según sea la separación espacial del proceso. Este comportamiento depende del tipo de biodigestor que se esté utilizando.

Se ha establecido la existencia de diferentes tipos de biodigestores clasificados principalmente por su forma, de acuerdo con su uso y su complejidad (Abello, 2018). Según su uso se distinguen los siguientes tipos: discontinuos, semicontinuos y continuos. Los primeros también conocidos como biodigestores “batch” cuentan con un flujo de operación que se realiza en un solo lote, debido a su manera de funcionar cada vez que el biodigestor se llena debe ser vaciado para poder iniciar el proceso nuevamente (Aguilera, 2019).

Para los de tipo semicontinuo se debe realizar una carga de materia prima de manera diaria, este se caracteriza por tener una producción de biogás directamente proporcional a la cantidad de

materia prima que ingresa al biodigestor. Por su parte los biodigestores continuos son utilizados en proyectos de mayor magnitud donde se alimenta permanentemente, por lo que es utilizado para aguas residuales y residuos de agroindustrias (Abello, 2018).

Si se realiza una división según la forma del biodigestor se pueden clasificar de cúpula fija y de cúpula móvil. Los primeros cuentan con una cúpula completamente hermética que se somete a presiones variables durante el proceso. Al ser estos de cúpula fija se deben armar en una sola estructura con materiales como ladrillos o concreto. Por su parte, los de cúpula móvil cuentan con una estructura sólida fija y otra parte flotante (Aguilera, 2019).

2.4. Ingeniería del proceso de producción de biogás

Los tipos de biodigestores mencionados en la sección 2,3 influyen directamente en cómo se manejan y procesan las etapas de producción de biogás, debido a factores como las características del sustrato, capacidad de procesamiento y objetivos específicos del sistema. El proceso de producción de biogás con fines energéticos se divide en seis etapas, que son: la recepción o almacenamiento del sustrato, pretratamiento, alimentación, la biodigestión, almacenamiento del digestado y el biogás y, por último, el postratamiento (Villarreal et al., 2021). En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo que es utilizado en las plantas de digestión anaerobia.

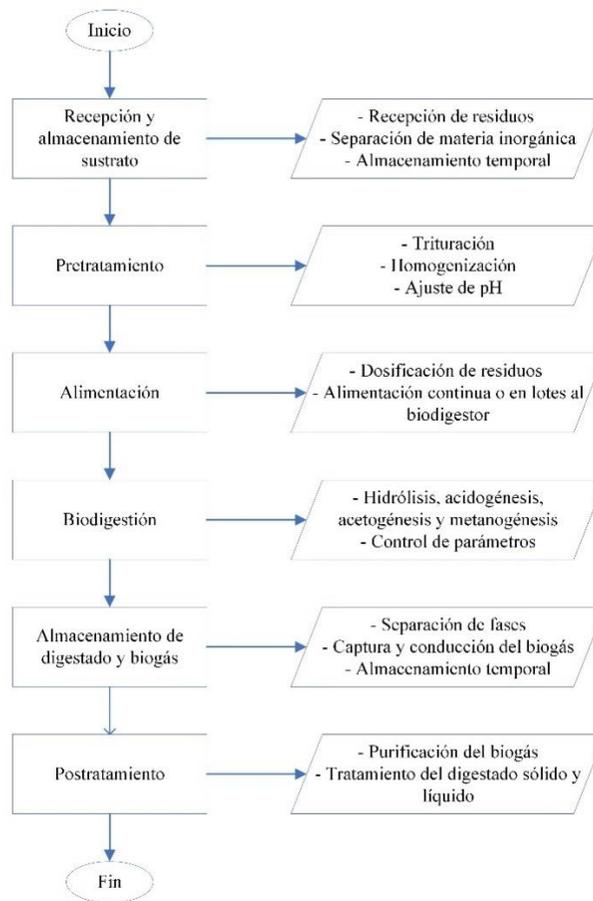


Figura 1. Diagrama de flujo utilizado en plantas de digestión anaerobia con fines energéticos.

2.4.1 Recepción y almacenamiento

En esta etapa los residuos orgánicos o sustrato llegan a la planta, desde distintas fuentes como granjas, plantas de procesamiento de alimentos, mataderos y estaciones de tratamiento de aguas residuales para ser almacenados temporalmente antes de ser procesados, de esta manera se puede dar una provisión controlada, continua y adecuada para la biodigestión. Dependiendo del tipo de sustrato se utilizan distintos tipos de almacenamiento como silos, tanques, lagunas cubiertas o almacenamiento a granel (Allendes, 2016).

2.4.2 Pretratamiento

La etapa de pretratamiento va a depender principalmente del reactor que se esté utilizando, además de las características de la materia prima (Romero, 2020). En esta etapa se busca acondicionar la materia prima de manera que se pueda obtener los mayores rendimientos, por lo que se basa principalmente en proporcionar facilidad de degradación de la materia. Para esta etapa existen alternativas como las térmicas, químicas, termoquímicas, físicas y otras como tratamientos enzimáticos (Villarreal et al., 2021). Luego de la alimentación o pretratamiento el proceso continúa con la etapa de digestión anaerobia.

2.4.3 Alimentación

En esta etapa el sustrato pretratado se introduce de forma controlada en el biodigestor. Es importante que se dé un suministro regular y uniforme del sustrato al biodigestor en este paso para poder mantener las condiciones óptimas de la biodigestión, además un manejo adecuado de esta etapa asegura que los microorganismos responsables de la digestión anaerobia tengan un suministro constante y óptimo de materia orgánica para conseguir mejores rendimientos en producción de biogás. (Allendes, 2016).

2.4.4 Digestión anaeróbica

En esta parte del proceso se da la degradación de materia orgánica, en la cual microorganismos en ausencia de oxígeno convierten un sustrato en biogás y residuos de digestado (Echeverría y Chamorro, 2018). Esta etapa se desarrolla en el reactor, por lo que es de gran importancia hacer la elección correcta de este.

Dentro de los tipos de reactores se encuentra una gran división que son los de baja y alta velocidad. Los primeros tienen la desventaja de contar con una tasa orgánica baja, por lo que no son adecuados para uso energético. Por el contrario los de alta velocidad que son los más apropiados para la digestión anaerobia. (Salazar y Cortes, 2019). Una vez que haya sucedido la digestión anaerobia se debe continuar con el proceso de postratamiento.

2.4.5 Almacenamiento del digestado y del biogás

El digestado y el biogás se recolectan en sistemas de almacenamiento por separado. En el caso del digestado se almacena para su posterior tratamiento para ser utilizado como biofertilizante. El

biogás se almacena para poder ser purificado y utilizarlo como fuente de energía (Villarreal et al., 2021).

2.4.6 Postratamiento

En el proceso de digestión anaerobia también se generan algunas impurezas gaseosas no deseadas, que no permiten que se puedan utilizar el biogás para fines energéticos. Por esta razón, la etapa de postratamiento es de suma importancia, ya que permite que se dé la purificación del biogás. Los tratamientos empleados en esta etapa se clasifican como biológicos y fisicoquímicos (Allendes, 2016).

El postratamiento es importante porque se protege la salud de las personas y la vida útil de los equipos, ya que se eliminan sustancias como el ácido sulfhídrico que es tóxico para el ser humano y altamente corrosivo para los equipos. Estas sustancias también son dañinas para el ambiente, por lo que es importante no combustionar el biogás en crudo para evitar inconvenientes legales (Allendes, 2016). Los gases contaminantes pueden ser eliminados o disminuir su presencia al utilizar algún método de filtración. Existen distintos métodos para purificar el biogás; entre ellos la adsorción física, la separación por membranas, separación criogénica, conversión química y procesos de oxidación (Schröer y Remler, 2018). En la Tabla 2 se muestra los gases que se recomiendan retirar del biogás según su uso final.

Tabla 2. Necesidad de eliminación de gases presentes en el biogás. Adaptado de (Condorchem Solutions, 2017)

Uso final	H ₂ S	CO ₂	Agua	Siloxanos	Halogenados
Combustible para vehículos	N	N	N	N	N
Caldera de vapor	R	NN	NN	N	NN
Motores de cogeneración	N	NN	N	N	N
Microturbinas	R	NN	N	N	N
Producción de Metanol/H ₂	N	NN	N	N	N
Inyección a la red de gas natural	N	N	N	N	N

N: Necesario R: Recomendado NN: No necesario

El biogás producido y purificado en esta etapa, tiene muchas aplicaciones energéticas, proporcionando una fuente de energía renovable y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles.

2.5. Usos y aplicaciones del biogás

Como muestra la Figura 2 el biogás tiene diversos usos como biocombustible, por ejemplo, se puede utilizar para generar calor, electricidad o utilizarse en sistemas de transporte. La electricidad se obtiene al utilizar el biogás como combustible en motores de combustión interna, además puede ser quemado para generar calor en calderas o puede utilizarse el gas para uso doméstico, ya sea solo o mezclado con gas natural (Abello, 2018).

En sistemas de transporte, este gas puede servir para suministrar o alimentar una estación que posteriormente abastecerá vehículos. Una de las grandes ventajas de este uso es la reducción de CO₂ producido por kilómetro que se recorre (Schröer y Remler, 2018).

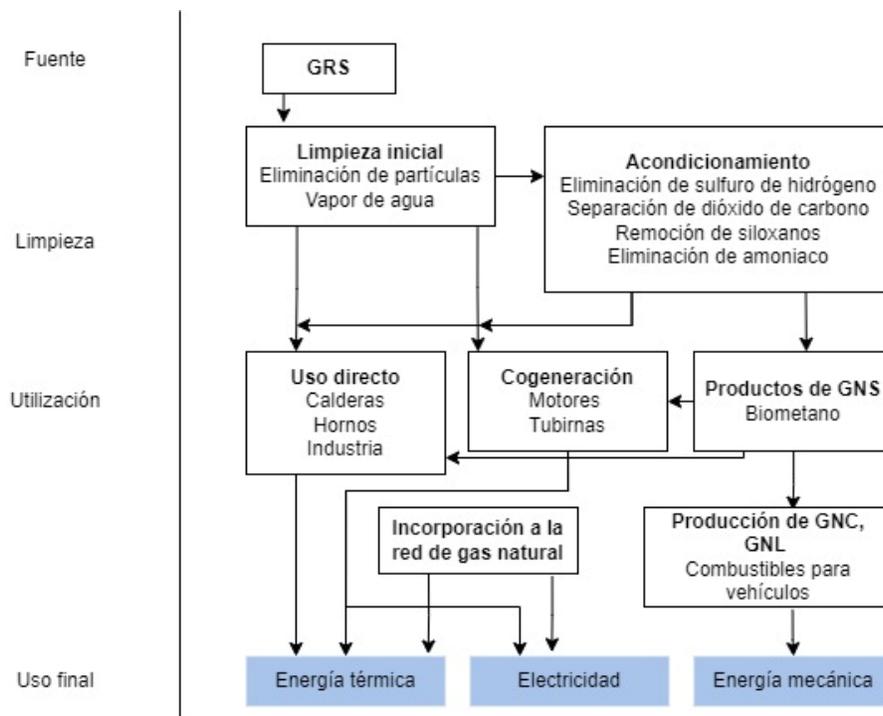


Figura 2. Aplicaciones del biogás y sus tratamientos. Adaptado de Abello (2018).

2.6. Riegos y seguridad en el biogás.

Los procesos de digestión anaeróbica mencionados en la sección 2.4 conllevan riesgos que deben gestionarse adecuadamente para garantizar seguridad en las operaciones. Por esto es importante considerar protocolos de monitoreo y control, seguridad y prácticas adecuadas de manejo. Como lo muestra la Tabla 3 el biogás es un gas altamente explosivo.

El rango explosivo de un gas hace referencia a la concentración en el aire dentro de la cual este gas puede encenderse y causar una explosión (INTECO, 2020). Esto significa que, si la concentración de biogás en el aire se encuentra entre 6 y 22 %, puede explotar si hay una fuente de ignición presente. En el caso de que el porcentaje de biogás presente en el aire sea menor a 6 % o mayor a 22 % la explosión no ocurriría.

Tabla 3. Comparación de características del biogás y otros gases. Adaptado de (INTECO, 2020)

Parámetro	Unidad	Biogás (60% CH ₄)	Gas natural	Propano	Metano	Hidrógeno
Temperatura de ignición	°C	700	650	470	600	585
Rango explosivo	%	6-22	4,4-15	1,7-10,9	4,4-16,5	4,77

El biogás producido en el proceso de digestión anaerobia contiene componentes como el metano, que son inflamables y pueden dar lugar a explosiones si se encuentran en concentraciones altas junto con una fuente de ignición, como chispas eléctricas o flamas. Es fundamental comprender estos riesgos y tomar medidas de seguridad adecuadas para prevenir accidentes graves. En Costa Rica ya se han presentado accidentes de este tipo. En la Figura 3 se muestra una explosión ocasionada por una descarga eléctrica natural, la cual impactó el reservorio de biogás de la planta. Esta imagen fue captada desde el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, Costa Rica.



Figura 3. Explosión en reservorio de biogás en una planta de digestión anaerobia costarricense (Sánchez, 2024).

2.7. Problemas en los componentes de biodigestores

Los sistemas de biodigestión anaeróbica al ser estructuras complejas pueden enfrentarse a una variedad de fallos que comprometen su funcionamiento adecuado. Según SARPA-FIRCO (2009) las principales problemáticas identificadas en sistemas construidos incluyen la inhibición en el proceso de biodigestión, las fugas, la falta de mantenimiento y las averías en los equipos.

2.7.1 Fallas en equipos

En el proceso de digestión anaerobia, los equipos que pueden presentar fallas van a depender de factores como el diseño de la planta, tipo de sustrato, condiciones operativas y escala (Lugo, Torres, y Lugo, 2012). Sin embargo, los sistemas o equipos que experimentan problemas con mayor frecuencia son: el sistema de mezclado, sistema de calefacción, sistema de control de temperatura, sistema de control de pH, sistema de recolección y tratamiento de biogás, sistema de alimentación, sistema de filtrado y fallas en el motogenerador (SARPA-FIRCO, 2009).

2.7.2 Fugas en el proceso de producción de biogás

Las fugas son una preocupación común en los sistemas de biodigestión y pueden manifestarse en diferentes áreas del sistema, incluyendo tuberías, la cubierta de geomembrana y sus anclajes. Es crucial identificar y abordar cualquier fuga potencial para garantizar el funcionamiento óptimo y la integridad del sistema (Lugo, Torres, y Lugo, 2012).

2.7.3 Inhibición del proceso de digestión anaerobia

Los procesos de inhibición en el proceso de biodigestión pueden ser causados por diversos factores, como la acumulación de ácidos grasos volátiles y amoníaco, pH extremo, presencia de compuestos tóxicos y temperaturas extremas.

Estos factores pueden afectar negativamente la actividad microbiana en el biodigestor, lo que resulta en una disminución de la producción de biogás. Además, una nula gestión de la alimentación y salidas del biodigestor pueden generar desequilibrio en la relación entre los sustratos orgánicos y los microorganismos (Valenti, Porto, Selvaggi, y Percorino, 2018). Asimismo, se pueden dar acumulación de sólidos que disminuyen el volumen de trabajo del reactor lo cual afecta directamente la cantidad y composición del biogás. Es crucial identificar y abordar estas inhibiciones para mantener un funcionamiento eficiente del sistema de biodigestión anaeróbica y garantizar una producción óptima de biogás (Moguel, 2018).

La inhibición por amoníaco sucede por la degradación de proteínas y compuestos nitrogenados dentro del proceso de digestión anaerobia, estos procesos pueden inhibir la producción de biogás debido a una disminución en el pH y altas concentraciones que llegan a ser tóxicas para las bacterias metanogénicas. La inhibición por ácidos grasos se desarrolla por la acumulación de ácido acético, propiónico y butírico en las fases acidogénica y metanogénica, su principal consecuencia es la disminución en el pH (Lugo, Torres, y Lugo, 2012).

El ácido sulfhídrico también tiene un alto potencial de inhibición dentro del proceso, ya que es altamente tóxico para los microorganismos anaerobios. Asimismo, algunos metales pesados como el cobre, zinc, mercurio y cadmio pueden inactivar enzimas esenciales en el proceso de la biodigestión. A su vez, se puede dar inhibición por la presencia de detergentes, sales y sustancias tóxicas, dado que las membranas celulares de los microorganismos son deterioradas (Schröer y Remler, 2018).

2.7.4 Problemas de mantenimiento

Las plantas de digestión anaerobia, por la complejidad de sus sistemas, deben contar con un plan de mantenimiento. Es común observar, especialmente en plantas más pequeñas o menos desarrolladas, que el mantenimiento puede ser reactivo en lugar de proactivo, lo que significa que las acciones de mantenimiento se realizan en respuesta a problemas o fallas que surgen durante la operación. Mantener un mantenimiento preventivo y correctivo ayuda a garantizar que los equipos y componentes funcionen de manera eficiente y segura, lo que contribuye a la producción continua de biogás y bioabono (Al Seadi et al., 2008).

Además, el mantenimiento regular ayuda a prevenir la aparición de problemas y reduce el riesgo de fallas inesperadas que podrían causar interrupciones en el proceso de digestión anaerobia. También puede prolongar la vida útil de los equipos y minimizar los costos de reparación a largo plazo. Los equipos o componentes que deben contar con un mantenimiento continuo son las tuberías, el quemador o antorcha, el moto generador, la geomembrana y la extracción de sólidos (SARPA-FIRCO, 2009).

2.8. Evolución de los diagnósticos en la digestión anaerobia

Los diagnósticos principalmente funcionan como una herramienta que de forma sistemática y ordenada recopilan información de importancia para realizar una tarea, proyecto o actividad. Sirve para detallar procedimientos y procesos específicos, lo que permite que las personas tengan una capacitación simple sin tener mayor conocimiento del tema. Es común que los diagnósticos existan para optimizar procesos y en este caso al tratarse de una tecnología poco conocida por muchas personas en el país, puede ser de gran ayuda para iniciar proyectos (Vergara, 2017). Además, es de conocimiento las grandes pérdidas económicas y de producción, debido al personal poco capacitado en las plantas, lo cual puede mejorar al realizar diagnósticos periódicos dentro de las plantas (Allendes, 2016).

Actualmente existen diagnósticos para el diseño y funcionamiento de biodigestores a nivel internacional; sin embargo, ninguno de estos contempla parámetros técnico-científicos para el funcionamiento óptimo, asimismo en Costa Rica no existe un diagnóstico dirigido a esta tecnología (Botero y Preston, 1987; Consultoría e Inversiones CABAL S.A, 2014; Hilbert, 2019; FAO, 2019; Romero, 2020; Villareal et al., 2021). La mayoría de estos diagnósticos explican de manera general el funcionamiento de las plantas; es decir, plasman la teoría, pero no exponen cómo aplicarla y desarrollarla ante distintos problemas que puedan surgir a lo largo del proceso.

Por otra parte, los diagnósticos existentes se enfocan en rendimiento a nivel de producción de biogás desde el punto de vista químico y biológico, por lo que dejan de lado la parte operativa y no contienen información de todos los equipos necesarios para un funcionamiento y producción adecuada, por ejemplo, bombas, tuberías, válvulas, reactores, motores, manómetros y estructuras de almacenamiento.

Otro factor de gran importancia es el postratamiento, ya que los diagnósticos existentes no cubren la generación de los gases tóxicos en el proceso (Botero y Preston, 1987; Consultoría e Inversiones CABAL S.A, 2014; Hilbert, 2019; FAO, 2019; Romero, 2020; Villareal et al., 2021).

Por otro lado, la integración de normas dentro de los diagnósticos que establezcan los requisitos mínimos para el diseño, operación y mantenimiento en plantas de digestión anaerobia, permiten mejorar el rendimiento operativo promover sostenibilidad y aceptación de esta tecnología en el mercado. En la siguiente sección se presentan algunas de las normas que funcionan como instrumento para diagnosticar plantas de digestión anaerobia.

2.8.1 Normas INTE E56:2020, INTE/ISO 20675 e INTE/ISO 22580

Las normas dentro de un proceso productivo permiten estandarizar y garantizar efectividad. En el caso de la producción de biogás, existen normas que buscan identificar y corregir problemas que

se puedan dar a lo largo del proceso. Estas normas son la INTE E56:2020, INTE/ISO 20675:2019, INTE/ISO 22580:2020.

La norma INTE E56:2020 “*Requisitos mínimos para las plantas de biogás de escala mediana y grande y sus componentes asociados*”, establece los requisitos mínimos para el funcionamiento, construcción, diseño, puesta en marcha, mantenimiento e inspección de sistemas de producción de digestión anaerobia para aprovechamiento de biogás. Esta norma utiliza de referencia las normas INTE/ISO 20675 e INTE/ISO 22580, la misma fue aprobada el 5 de octubre del 2020 y se clasifica dentro del sector de energía (Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica [INTECO], 2020).

La norma INTE/ISO 20675:2019 “*Términos, definiciones y esquema de clasificación para la producción, acondicionamiento, mejoramiento y utilización de biogás*”, contiene las principales definiciones de términos y clasificaciones relacionadas con la producción de biogás, gasificación de biomasa, acondicionamiento de biogás, utilización y mejoramiento de este. Esta norma fue aprobada el 29 de junio del 2019 y se clasifica dentro del sector de energía (INTECO, 2019).

La norma INTE/ISO 22580:2020 “*Antorchas para la combustión de biogás*”, este es un documento aplicado al diseño, fabricación, instalación y operación para la combustión de biogás. Esta norma utiliza como referencia las normas ISO 13577-2:2014, ISO 13577-4, ISO 16852, INTE/ISO 20675:2019, ISO 23551-1, IEC 60730-2-5, IEC 60730-2-6, IEC 62305-2, IEC 60079-10 -1, la misma fue aprobada el 21 de noviembre del 2020 y se clasifica dentro del sector de energía (INTECO, 2020).

2.8.2 Pruebas de potencial de biometano (PBM)

Las pruebas de potencial de biometano son ensayos que evalúan la capacidad de un sustrato para generar biometano mediante la digestión anaerobia. Estas pruebas permiten la cuantificación de productividad de biogás, biodegradabilidad de la materia, rendimiento de conversión a metano y comportamientos inhibitorios dentro del proceso; pudiéndose utilizar igualmente para monitorear sistemas a gran escala, para la evaluación de la idoneidad del sustrato, la optimización de las condiciones de proceso y la reducción de riesgos y costos asociados con la implementación de sistemas a gran escala (Ortiz y Carvajal, 2023).

Las PBM se realizan en laboratorios y constan de varias fases. En la primera etapa, se prepara el sustrato adecuadamente, incluyendo su trituración y homogeneización. Posteriormente, el sustrato se introduce en un reactor anaerobio controlado para iniciar la fermentación microbiana. Durante este proceso, se monitorean diversos parámetros, como la producción de biogás, la temperatura, agitación, acidez y la composición del biogás. Una vez finalizada la digestión anaerobia, se analizan los resultados obtenidos para evaluar la cantidad y calidad del biogás producido.

2.8.3 Modelo de Gompertz

Los modelos de predicción, como el de Gompertz, ofrecen herramientas para comprender el comportamiento de las fases en la digestión anaerobia mediante una regresión no lineal (Blanco y Peña, 2019). Este modelo explica la cinética del proceso, incluyendo la producción máxima de metano, la tasa de producción máxima y la fase de letargo que indica la transformación del sustrato y su relación con la generación de biogás. Además, estos modelos se ajustan eficientemente a las curvas de crecimiento tipo "s", siendo útiles incluso con pocos datos. Tienen la ventaja de que

pueden explicar la cinética de crecimiento bacteriano en el proceso de digestión anaerobia con correlaciones de hasta el 97 %, esto permite seleccionar las condiciones de operación óptimas en un sistema (Solarte, Mariscal, y Aristizábal, 2017).

El modelo de Gompertz identifica tres etapas en las gráficas de producción de biogás. La fase inicial de rápido arranque o de latencia, se caracteriza por un rápido incremento en la producción de biogás. Durante este período, las bacterias metanogénicas comienzan a colonizar el sustrato y a descomponer la materia orgánica, lo que conduce a una liberación rápida de biogás (López, Barrón, Franco, Paz, y Pérez, 2021). En la fase de crecimiento exponencial, la actividad microbiana alcanza su punto máximo y la producción de biogás aumenta significativamente con el tiempo, durante esta fase la tasa de aumento en la producción de biogás es alta. A medida que progresa el tiempo, la tasa de aumento en la producción de biogás comienza a disminuir, marcando la fase de desaceleración o estacionaria. La descomposición de la materia orgánica se ralentiza y la producción de biogás alcanza un máximo, luego se estabiliza o disminuye gradualmente (Parra y Alexis, 2014).

Este modelo se puede utilizar para parametrizar las pruebas de PBM, ya que brinda una descripción del crecimiento microbiano en un tiempo específico, lo cual permite determinar la tasa máxima de producción de biometano e identificar procesos de inhibición. Esto es importante, dado que, con estos resultados se pueden ajustar condiciones dentro del biodigestor para que la adaptación de los microorganismos sea la correcta, además se puede mejorar la disponibilidad de nutrientes y optimizar condiciones operativas.

2.8.4 Metodología de análisis modal de fallos y efectos (AMFE)

La metodología del Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE) se destaca por su versatilidad y utilidad en diversos ámbitos. Ofrece una comprensión detallada de las actividades realizadas, la detección de posibles fallos y sus impactos, y la implementación de medidas para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente de los servicios o procesos (Ramírez, 2021).

Este enfoque permite identificar los potenciales modos de fallo en sistemas, productos u operaciones, así como las características críticas que requieren una atención especial para prevenir o detectar tales fallos. Se pueden distinguir distintos tipos de AMFE, como los enfocados en sistemas, diseño, procesos, servicio y software (Castillo y Michalus, 2023).

En la Figura 4 se muestra el procedimiento a seguir para la aplicación de la metodología AMFE. En esta metodología inicialmente se debe definir la cadena de suministro, es decir, se debe determinar qué sistema, proceso o producto se va a analizar. Seguidamente se debe describir el sistema para determinar los componentes o etapas principales, además de las funciones y operaciones del proceso. Luego se deben de identificar los modos de falla, es decir, la manera específica en que un componente, sistema o proceso puede fallar. Después se deben especificar los efectos de estos modos de falla junto con las causas potenciales. Luego se debe determinar el nivel de gravedad, frecuencia y detectabilidad, para generar el valor del número de prioridad de riesgo (NPR). Basado en este número de prioridad de riesgo se priorizan los modos de falla con NPR más altos y se desarrollan acciones correctivas junto con la definición de personas responsables. Por último, se deben llevar a cabo las acciones correctivas propuestas y calcular el nuevo NPR para ver si ha habido una mejora.

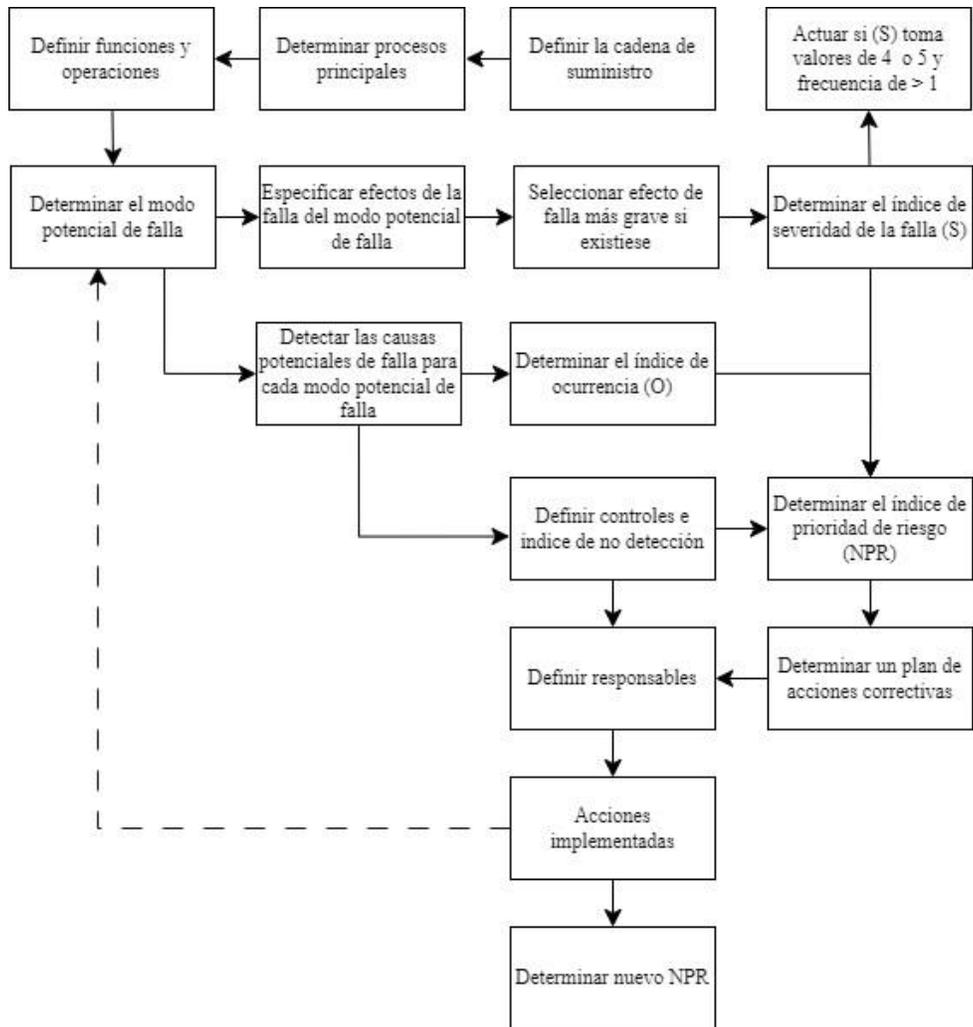


Figura 4. Procedimiento de aplicación de la AMFE. Adaptado de Castillo y Michalus (2023).

La metodología AMFE permite estructurar, de una manera clara, documentación que asegure que las acciones correctivas sean implementadas y mapeadas, según su nivel de prioridad y criticidad. En el proceso de biodigestión la metodología AMFE puede ayudar a optimizar etapas, priorizar medidas correctivas, incluir mejoras en el diseño del proceso y se pueden introducir controles de calidad que no se tengan contemplados.

3. METODOLOGÍA

3.1 Objetivo 1: Desarrollo de la guía de inspección

Con el fin de reunir la información necesaria para el desarrollo de la guía de inspección como herramienta de diagnóstico se utilizaron medios de recolección primarios y secundarios. Como parte de las fuentes primarias se utilizaron artículos de publicaciones periódicas, normas técnicas, tesis, manuales operativos y reportes de asociaciones.

La revisión documental fue de tipo exploratoria y descriptiva, esto permitió la comprensión de los detalles que conlleva todo el proceso de digestión anaerobia, sus características técnicas y bioquímicas y cada uno de los parámetros que impactan la producción de biogás (Reyes, 2017). Luego de obtener las fuentes de recopilación de información necesaria se verificó que todos los documentos reunidos estuvieran completos, actualizados y correctos.

El desarrollo de la guía de inspección se llevó a cabo por medio de tres fases, las cuales se muestran en la Figura 5.

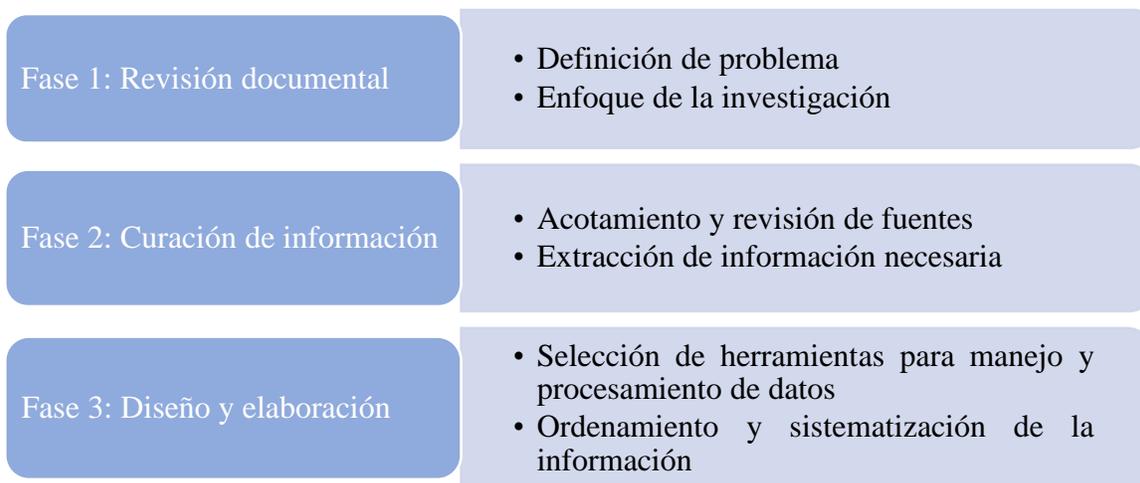


Figura 5. Fases metodológicas para desarrollo de la guía de inspección.

3.1.1 Fase 1: Revisión documental

Como parte de la fase 1 se inició definiendo el problema, debido a que se quiere evaluar la eficiencia de revalorización de residuos en el país, y así determinar oportunidades de mejora en el proceso de producción de biogás, se deben de comprender y estudiar todos los parámetros que pueden volver crítico el proceso. Esta revisión documental permitió conocer los antecedentes técnicos, químicos y biológicos de proceso de digestión anaerobia, además del funcionamiento correcto de las plantas. Asimismo, se dio un enfoque de la investigación descriptivo, ya que este proyecto requiere todos los detalles del proceso y esta modalidad permite tener un total entendimiento de cada etapa. Dentro de esta fase se utilizó como filtro de información el uso de palabras claves que permitieran encontrar la información correcta.

3.1.2 Fase 2: Curación de información

En la fase 2, se inició por acotar y revisar las fuentes bibliográficas. La mayor parte de la información final utilizada en la herramienta se sintetizó de las normas INTE E56:2020, INTE/ISO 20675 e INTE/ISO 22580, además de algunos manuales operativos, artículos científicos y tesis. En todas las fuentes utilizadas (Tabla 4) se hizo extracción de la información más relevante y pertinente para la elaboración de los puntos de evaluación, lo que permitió tener una depuración inicial.

Tabla 4. Fuentes consultadas para definir parámetros críticos del proceso de biodigestión.

Cita	Parámetros							
	Químico/Biológico			Técnicos		Operacionales		
	pH	DQO	ST/ SV	TRH	T	Tuberías/ accesorios	Riesgos	Sistemas/ Equipos
(Botero y Preston, 1987)	X							
(FAO, 2011)	X		X	X	X			X
(Álvarez y Duque, 2014)	X		X					X
(Machorro y Méndez, 2011)						X		
(FNR,2012)								
(INTECO, 2019)	X			X	X	X		X
(INTECO, 2020)	X	X	X	X	X	X	X	X
(Galvis y Rivera, 2013)	X	X	X					
(Cubero, 2011)	X	X	X					
(Doroteo, 2012)	X	X	X	X	X			
(Garzón, 2011)								X
(González, 2015)	X	X	X	X	X	X		
(Jiménez, 2014)	X			X	X	X		X
(ONU,2019)						X	X	X
(Carrasco, 2015)				X	X	X	X	X

Las tesis, artículos y manuales se utilizaron como referencia de datos que son cruciales en el funcionamiento de las plantas. La mayoría de estos datos brindan un respaldo a la información utilizada de las normas, para así poder optimizar la herramienta con valores teóricos.

3.1.3 Fase 3: Diseño y elaboración de la herramienta

Para el desarrollo de esta fase se inició con la elección de Microsoft Excel como el programa de edición y procesamiento de los datos. Debido a que se buscaba que la herramienta sea de fácil uso y que se pueda comprender sin complicaciones se realizó una división de la información en secciones (Figura 6). Cada sección de estas se colocó en una hoja de Excel aparte para mantener una organización adecuada. Para la elección de cada una de las secciones y su ordenamiento se consideró el flujo de cada una de las etapas para producción de biogás, con el fin de mantener una continuidad a la hora de aplicar la herramienta en planta. A su vez, para mayor facilidad se utilizaron listas desplegables en algunos de los criterios de evaluación dentro de la herramienta, estas listas permiten elegir la categoría a la cual se ajusta mejor el biodigestor que se esté inspeccionando. Además, se utilizaron listas para crear vínculos con los criterios de la metodología AMFE y así determinar que los valores de parámetros medidos se encuentren en los rangos esperados.

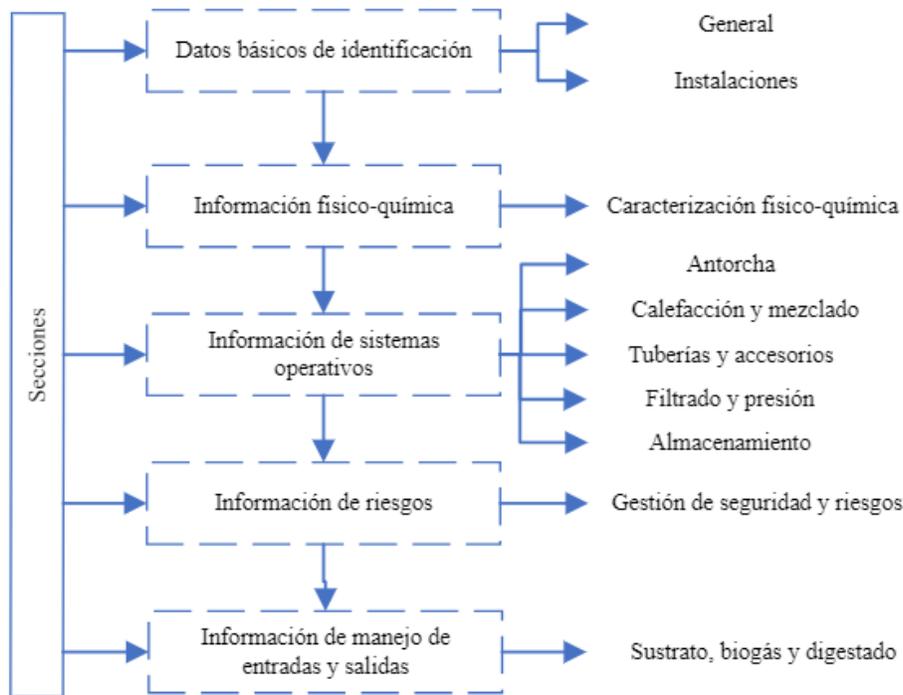


Figura 6. División de información y secciones en la herramienta.

Para lograr un adecuado uso de la herramienta se utilizaron botones programados que redireccionan a cada una de las secciones, estos botones se posicionaron en la parte superior de cada hoja para que sean de fácil visualización. En el espacio de la herramienta utilizado para recolectar la información específica de cada planta, se adicionaron cuatro columnas para indicar las observaciones, el nivel de gravedad, la frecuencia y la detectabilidad de las fallas. Lo anterior con el fin de que sea más fácil para el evaluador tomar nota de aspectos importantes en campo y poder asignar un nivel de gravedad inmediato de la falla o el incumplimiento de algún punto. Para establecer un valor correcto en la gravedad y detectabilidad se agregó a la herramienta una tabla que contiene los criterios de selección y su valor correspondiente.

Dentro de la herramienta se agregaron gráficos en cada sección que incluyen el nivel de cumplimiento y el nivel de gravedad. El gráfico de nivel de gravedad utiliza clasificadores como “Muy Bajo”, “Bajo”, “Moderado”, “Alto” y “Muy Alto” para determinar el porcentaje de criterios que se catalogan en cada una de estas clasificaciones. A su vez, se consideró ver reflejado los parámetros que tienen mayor impacto en la producción de biogás, por lo que se utilizó una escala de severidad, donde uno corresponde a parámetros de poco impacto y dos a parámetros de alto impacto. De esta manera los parámetros de alto impacto al ser multiplicados por dos siempre tendrán mayor proporción de gravedad y será reflejado en el gráfico elaborado para ello. Asimismo, dentro de la herramienta cada criterio es clasificado como “No cumple”, “Cumple” o “No Aplica”, con ayuda de esta información se realiza el cálculo del porcentaje de criterios que cumplen o no cumplen. Este porcentaje es mostrado en el gráfico de cumplimiento en cada sección analizada.

Debido a que ninguna norma incluye especificaciones para determinar la calidad del biometano, en la herramienta se agregan secciones específicas para cuantificar parámetros claves. Estos parámetros indican la cantidad y calidad de biogás que se puede generar en una planta en específico según sus características de funcionamiento, para ello se considera la demanda química de oxígeno, pH, análisis de sólidos volátiles, sólidos totales y distribución de gases presentes en el biogás. Dentro de la guía de inspección elaborada, se contempló implementar la metodología AMFE para poder identificar las fallas potenciales presentes en las plantas, además para evaluar riegos y así desarrollar medidas preventivas o procesos de mejora continua.

3.2 Objetivo 2: Diagnóstico

3.2.1 Elección de las plantas de digestión anaerobia

La selección de las plantas de digestión anaerobia para el diagnóstico fue realizada mediante el estudio de una base de datos proporcionada por ASOBIOGÁS (Tabla 5 y Tabla 6). Se identificaron 452 biodigestores distribuidos a lo largo del territorio nacional. Dentro de estos datos se identificaron 222 plantas relacionadas a una actividad productiva.

Tabla 5. Filtro inicial para selección de plantas de digestión anaerobia. Fuente: ASOBIOGÁS.

Escala	Tipo de Biodigestor	Cantidad
Mediana	Escala mediana - Bolsa	266
	Escala mediana - Laguna cubierta	25
	Escala mediana - Prefabricado	143
Industrial	Escala industrial - CSTR	6
	Escala industrial - UASB	12

CSTR: Reactor continuo de tanque agitado.

UASB: Reactor anaerobio de flujo ascendente

Tabla 6. Datos sobre categorías de selección para plantas de digestión anaerobia. Fuente: ASOBIOGÁS.

Actividad	Tipo de Biodigestor		Totales
	Escala Industrial	Escala Mediana	
Café	4	1	5
Palma aceitera	1	1	2
Porcino	1	104	105
Vacuna	-	64	64
Avícola	-	1	1
Caña	1	-	1
Urbano	1	27	28
Mataderos	2	2	4
Aguas Agroindustriales	-	1	1
Aguas industriales	8	3	11
Desconocido	-	230	230
Totales	18	434	452

Se seleccionaron cuatro plantas considerando las categorías de escala, volumen y tipo de biodigestor. Adicionalmente, se consideró que el sistema estuviera operando con normalidad. En la Figura 7 se muestran las plantas seleccionadas con sus respectivos tipos de sustrato y tipo de biodigestor.

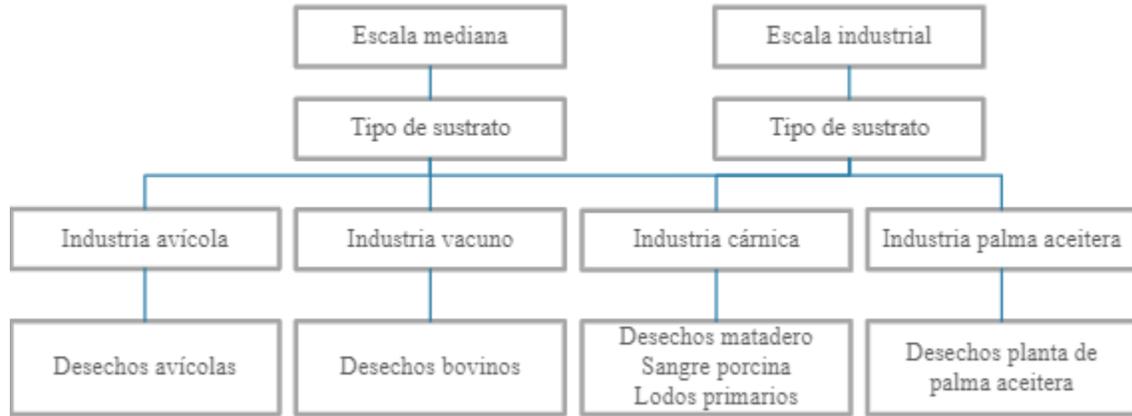


Figura 7. Plantas seleccionadas y sus tipos de sustratos.

3.2.2 Selección de puntos de muestreo

Como se describió anteriormente, existe gran diversidad en las plantas de digestión anaerobia seleccionadas, ya que poseen un funcionamiento y etapas diferentes debido a la naturaleza del sustrato y volumen del biodigestor. Este funcionamiento diversificado condujo a que los puntos de muestreo en cada planta fueran seleccionados según el diseño y sitios aptos para obtener una muestra homogénea.

Como se mostró en la Figura 7 todos los sustratos son diferentes, por lo que su movimiento dentro del sistema depende directamente de su naturaleza. En las plantas de escala mediana debido a la facilidad, las muestras del afluente fueron tomadas desde el tanque de recepción de materia prima.

Por otra parte, las muestras de las plantas de tipo industrial se recolectaron directamente de la tubería que conduce el material al biodigestor. En el caso de la planta de industria cárnica los desechos del matadero y los lodos primarios se conducen por una misma tubería. Sin embargo, la sangre por sus características debe ser inyectada directamente al biodigestor por una tubería exclusiva, por lo que la muestra fue tomada por separado y se realizó la mezcla junto con las otras entradas en el laboratorio de bioenergía.

Respecto a las muestras del efluente, en las plantas de escala mediana se recuperó el efluente directamente del biodigestor por medio de una tubería. Asimismo, en las plantas de escala industrial se tomaron las muestras desde los tanques de almacenamiento del digestado.

3.2.3 Recolección de datos y toma de muestras

La recolección de los datos necesarios para completar la herramienta y realizar el diagnóstico fueron tomados de forma presencial y fueron digitalizados en campo. Los datos específicos relacionados a la operatividad de las plantas fueron consultados a la persona encargada.

Se realizaron tres muestreos simples para cada planta entre julio y septiembre de 2023. Para recolectar las muestras en los biodigestores, se agitó el efluente o afluente con un agitador manual. En algunas plantas, se usó un muestreador con brazo extendido debido a la dificultad de acceso a los puntos de recolección.

Las muestras del afluente y efluente se tomaron directamente de los tanques de almacenamiento o de las tuberías, según lo permitiera las condiciones de la planta. En cada visita, se recogieron 3 kg de muestra de efluente y 3 kg de muestra de afluente. Se eliminó todo el material inorgánico, como piedras, ramas o musgo, que pudiera afectar los resultados. Luego, las muestras se mantuvieron en una hielera a 4 °C antes de almacenarlas en el laboratorio para su posterior análisis.

Para cada visita se contempló un tiempo de separación de tres a cuatro semanas entre sí, con el fin de realizar un muestreo en condiciones de operación diferenciado. También se consideraron circunstancias específicas de la planta como horarios de trabajo y funcionamiento.

3.2.4 Caracterización y análisis fisicoquímico de afluentes y efluentes

3.2.4.1 Demanda química de oxígeno (DQO) y pH

La demanda química de oxígeno se determinó utilizando la metodología planteada por American Public Health Association (APHA) (1989). Las muestras del afluente y el efluente se diluyeron con agua destilada de modo que se mantuvieran en un rango de 5 mg/L a 1500 mg/L de DQO, debido a que es el rango de medición que permite el reactivo utilizado para los ensayos. Los factores de dilución para el DQO se calcularon utilizando los datos de sólidos volátiles en cada muestra como referencia.

En tubos de 10 ml con tapa de rosca se colocó 2 ml de la muestra diluida (Figura 8). Para cada muestra este ensayo se realizó por triplicado. Con ayuda del equipo modelo DRB200 marca HACT LTV las muestras se mantuvieron a una temperatura de 150 °C por 2 horas, luego se dejaron enfriar para posteriormente realizar la medición de absorbancia de las muestras utilizando el colorímetro modelo DR900 marca HACH.



Figura 8. Tubos de ensayo para pruebas de DQO después de salir del horno.

Para la medición de pH se utilizó el estándar INTE/ISO 10523:2016 y el equipo modelo H1 2211 marca HANNA previamente calibrado. Con el fin de asegurar la homogeneidad, se colocaron 50 ml de la muestra en un beaker a temperatura ambiente y se utilizó una pastilla magnética para mezclar durante 15 s antes de tomar las mediciones.

Las mediciones de pH para las muestras frescas, predigestión y postdigestión se realizaron en un rango de 72 horas después de ser recolectadas. Esto con el fin de obtener datos semejantes a las condiciones del biodigestor y los PBM.

3.2.4.2 Sólidos totales y volátiles

Para la medición de los sólidos volátiles y sólidos totales se utilizó el método 2540 de Standard methods for examination of water and wastewater presentado por APHA (1989). Se realizaron en el laboratorio de Bioenergía de la Escuela de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica.

La caracterización de las muestras frescas se realizó en un rango no mayor a 48 horas después de ser recolectadas. Para realizar los ensayos se colocaron inicialmente los crisoles en el horno para un proceso de limpieza durante 15 min a una temperatura de 105 °C. Luego se pesaron las muestras con ayuda de una balanza analítica Sartorius con una legibilidad de 0,1 mg. Para las muestras en las cuales el contenido de sólidos visibles era moderado se utilizó un volumen de 30 ml, mientras que se utilizó 10 ml para las muestras con contenido de sólidos visibles alto.

En el horno de convención forzada marca JEIO TECH modelo OF-22GW se realizó el secado de las muestras a 105 °C por 24 h para determinar el contenido de materia seca. De manera complementaria se midió el contenido de cenizas y sólidos volátiles por medio de ignición en la mufla marca Yamato modelo F0810CR a una temperatura de 550 °C por un tiempo de 6 h. Estos datos de caracterización fueron medidos por triplicado y los valores con un error estándar promedio mayor al 15 % se descartaron según lo establecido en la metodología APHA (1989). Asimismo, los ensayos que pasaran el valor límite establecido para el error fueron repetidos.

Después de finalizar la recolección de datos de la caracterización se utilizó la ecuación (1), para calcular el valor de sólidos totales y sólidos volátiles.

$$ST \text{ o } SV = \frac{(A-B) \times 10^6}{v_{muestra}} \quad (1)$$

Donde, ST son los sólidos orgánicos e inorgánicos en mg/L que quedan después de evaporar toda el agua de una muestra, SV son la fracción de sólidos totales en mg/L que se evaporan cuando la muestra se calienta a temperaturas altas, A es la masa residual de la muestra en g después del secado a 105 o 550 °C + la masa del crisol en g, B es la masa del crisol en g. $V_{muestra}$ es el volumen en mL de la muestra colocada en el crisol.

Para el caso de la predigestión y postdigestión en ensayos PBM, se realizó el cálculo de consumo de sólidos totales y sólidos volátiles como se muestra en la ecuación (2) y ecuación (3).

$$\Delta ST = \overline{ST}_{pre} - \overline{ST}_{pos} \quad (2)$$

$$\Delta SV = \overline{SV}_{pre} - \overline{SV}_{pos} \quad (3)$$

Dónde ΔST y ΔSV representan el consumo de sólidos totales y volátiles en mg/L, \overline{ST}_{pre} y \overline{SV}_{pre} son el promedio de sólidos totales y volátiles en mg/L de las muestras de predigestión. \overline{ST}_{pos} y \overline{SV}_{pos} son el promedio de sólidos totales y volátiles en mg/L de las muestras de postdigestión.

3.2.4.3 Parametrización de producción de metano de diferentes materias primas

Las pruebas de potencial de biometano (PBM) se realizaron siguiendo la metodología realizada por Faivor y Kirk (2011) validada en el laboratorio de Bioenergía por Solano (2020). Se prepararon mezclas de 300 g que incluye el inóculo (60 g), la muestra y agua destilada. De estos 300 g se utilizaron 150 g para introducir en una botella con un tapón tipo septum para mantener en condiciones anaerobias y para simular un reactor tipo batch (Figura 9). Luego de ser sellada la botella se utilizó nitrógeno para desplazar el oxígeno dentro de la misma y así favorecer a la atmósfera anoxia. Estas botellas se almacenaron en una incubadora marca Yamato modelo IC603CR (Figura 10) a 37 °C durante 720 horas. Durante este tiempo se realizaron mediciones diarias de biogás con ayuda de una jeringa. Con los 150 g de mezcla restante se realizaron pruebas de predigestión, las cuales incluían sólidos totales, sólidos volátiles y pH. Al pasar las 720 horas del ensayo, se realizaron pruebas de postdigestión utilizando parte del digestado de los reactores, las cuales incluían sólidos totales, sólidos volátiles y pH.



Figura 9. Biorreactor tipo batch utilizado en el laboratorio.



Figura 10. Biorreactores en condiciones contraladas dentro de incubadora.

La cantidad de sustrato a mezclar se obtuvo por medio de la ecuación (4), de manera que la relación de sólidos volátiles entre el sustrato y el inóculo sea de 2:1 (Chynoweth , Turick, Owens, Jerger, y Peck, 1993). En el caso de la planta de industria vacuna, debido a que los datos de sólidos volátiles se mantenían muy bajos, esta relación de 2:1 se modificó a una relación 10:1 en todas las repeticiones.

$$SV/SV = \frac{(m_{inóculo} * SV_{inóculo})}{(m_{sustrato} * SV_{sustrato})} = 2 \quad (4)$$

Donde $m_{inóculo}$ es la masa del inóculo (60 g), $SV_{inóculo}$ es el contenido de sólidos volátiles en mg/kg del inóculo, $SV_{sustrato}$ son los sólidos volátiles en mg/kg del sustrato y $m_{sustrato}$ es la masa en g del sustrato que se requiere conocer.

Para el caso de la planta de la industria cárnica, debido a sus condiciones de operación, fue necesario realizar dos tipos de mezclas para determinar cuál generaba mejores resultados de productividad. Esta planta recibe diariamente una cantidad aproximada de sangre que se mantiene en el rango de una o dos tanquetas, lo que representa 1,22 m³ y 2,44 m³ respectivamente, por esto las pruebas de potencial de biometano se realizaron para ambas condiciones.

Con las mediciones diarias de biogás se realizó el cálculo de producción teórica de metano, para esto se calculó el biogás acumulado con la ecuación (5).

$$V_{acumulado} = \sum_{i=0}^t V_{diario} \quad (5)$$

Donde $V_{acumulado}$ es el volumen de gas acumulado (ml), t son 720 horas y V_{diario} es la medición de la producción de biogás medida diariamente (ml).

Para el cálculo de productividad se siguió la ecuación (6).

$$P_{sustrato} = \frac{(V_{acumulado} - \bar{V}_{control})}{(VS_{sustrato} * m_{sustrato})} * 1000 \quad (6)$$

Dónde $P_{sustrato}$ es la productividad de biogás de la muestra del sustrato (L/[kg iniciales de SV]), $V_{acumulado}$ es el volumen acumulado del gas producido (ml), $\bar{V}_{control}$ denota el volumen acumulado promedio producido por los reactores control, $VS_{sustrato}$ es el contenido de sólidos

volátiles en la muestra del sustrato (mg/kg), y $m_{sustrato}$ representa la masa de muestra del sustrato agregada a la botella serum (kg).

Los datos obtenidos de generación de biogás fueron modelados en el programa Matlab y su aplicación Curve Fitting, utilizando la ecuación (7). En el Anexo C se muestra el código utilizado. La ecuación del modelo de Gompertz permitió modelar las condiciones cinéticas del proceso y a su vez conocer la cantidad de materia orgánica que puede degradarse. Este modelo es el más utilizado comúnmente para la digestión anaerobia y supone una tasa de producción de biogás directamente proporcional a la actividad microbiana (Pecar y Gorseck, 2020). Además, es considerado uno de los mejores modelos para describir el crecimiento bacteriano en un reactor tipo batch (Zwietering, Jongenburger, Rombouts, y Riet, 1990).

$$G(t) = ae^{-be^{-ct}} \quad (7)$$

Donde G es la producción acumulada de metano [mL CH₄/g SV], a es el valor máximo de producción acumulada de metano [mL CH₄/g SV], b es la tasa constante de producción de metano [mL CH₄/g SV/h], c es el tiempo de lag o eficiencia microbiana [h] y t el tiempo en horas.

3.2.5 Medición de calidad de biogás en planta

Para la determinación de gas producido en planta se utilizó el equipo medidor de gases Multitec 545 (Figura 11). Este equipo incorpora una serie de sensores infrarrojos para medición de hidrocarburos y dióxido de carbono, los cuales funcionan bajo el principio de celda electroquímica, el equipo también puede medir simultáneamente hasta cinco gases.



Figura 11. Medidor de gases Multitec 545.

La lectura con este equipo se realizó directamente desde una válvula en la tubería de conducción del biogás, se utilizó una bolsa de almacenamiento para el biogás y se introdujo la sonda manual directamente. Debido a que la temperatura de trabajo del equipo es de 40 °C máximo, se utilizó un condensador portátil para disminuir la temperatura del biogás. Con el fin de mantener estabilidad en los datos del equipo se realizó cada medición por un tiempo aproximado de 5 minutos.

3.2.6 Desarrollo de la metodología de análisis modal de fallos y efectos (AMFE)

La metodología AMFE se desarrolló con ayuda de los datos obtenidos a través de la herramienta elaborada. Para esta metodología se utilizaron los parámetros de gravedad, frecuencia y detectabilidad como componentes de identificación para clasificar los fallos en cada planta. En las Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9 se muestra la definición y valor otorgado a cada parámetro para definir el nivel de criticidad en cada etapa, sistema o componente vinculado al proceso de producción de biogás.

Tabla 7. Clasificación para la gravedad de la falla y su valor asociado.

Probabilidad	Criterio	Valor
Muy baja	Repercusiones imperceptibles. Un fallo de este tipo no ocasiona un efecto real sobre el rendimiento del sistema. Probablemente el inspector ni detectaría el fallo.	1
Baja	Repercusiones apenas perceptibles. El fallo podría ocasionar ligeros inconvenientes. Probablemente se observe un pequeño deterioro del sistema.	2
Moderada	Se logra observar un deterioro en el sistema que afecte su funcionamiento.	3
Alta	El fallo es crítico y llega a inutilizar el sistema.	4
Muy alta	El fallo es potencialmente crítico y afecta directamente el proceso y su seguridad. Implica no conformidad con los reglamentos en vigor.	5

Tabla 8. Clasificación para la frecuencia de la falla y su valor asociado.

Probabilidad	Criterio	Valor
Improbable	Los fallos no se asocian a procesos con alguna similitud, la probabilidad de ocurrencia es poco concebible.	1
Posible	Los fallos son aislados en procesos con alguna similitud, es poco probable que suceda, pero se puede esperar.	2
Ocasional	El fallo aparece ocasionalmente en procesos con alguna similitud, es probable que aparezca repetidas veces en la vida útil del sistema.	3
Probable	El fallo se presentó con frecuencia en anteriores ocasiones con procesos similares.	4
Frecuente	El fallo se produce frecuentemente y es casi inevitable.	5

Tabla 9. Clasificación para la detectabilidad de la falla y su valor asociado.

Probabilidad	Criterio	Valor
Nula	El defecto no se puede detectar, es casi seguro que se perciba hasta que ocasione un fallo.	5
Pequeña	Se tiene un defecto difícil de detectar por su naturaleza.	4
Media	El defecto se puede detectar, en las últimas revisiones.	3
Moderada	Se tiene un defecto fácil de detectar, pero que se podría pasar por alto una primera vez.	2
Alta	Se tiene un defecto obvio. Es muy fácil de detectar con controles normales.	1

Para la elaboración de la matriz de la metodología AMFE se utilizó el procedimiento que se muestra en la Figura 12.

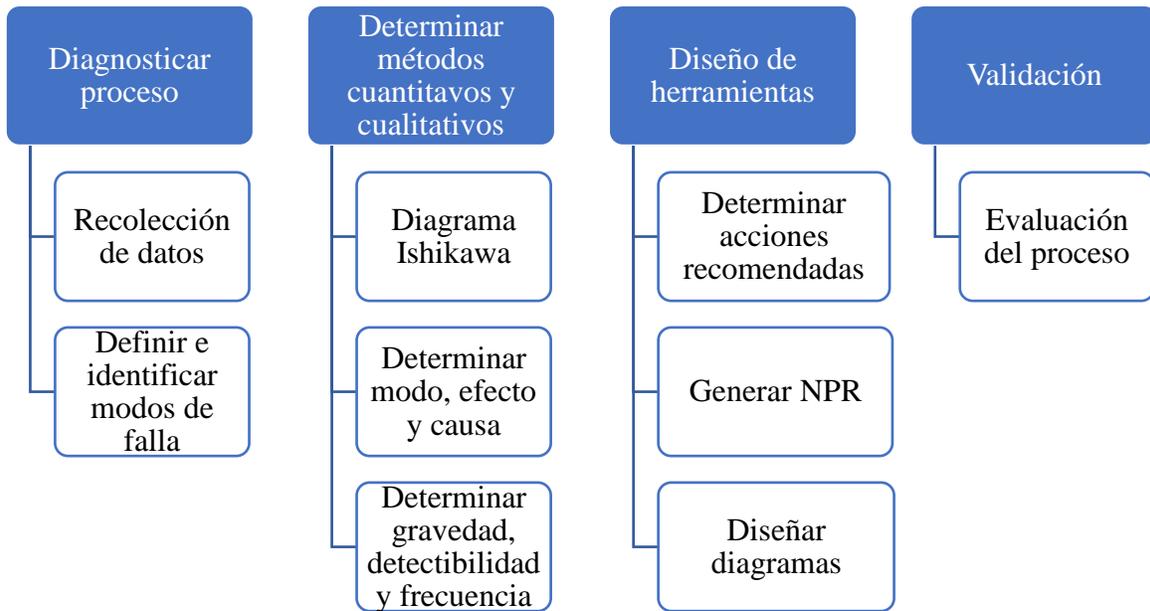


Figura 12. Proceso utilizado para el desarrollo de la metodología AMFE.

Se elaboró una matriz para el desarrollo de la metodología y con ayuda de esta matriz se determinó el número de prioridad de riesgo (NPR) utilizando la ecuación (8).

$$NPR = D \cdot G \cdot F \quad (8)$$

Donde D es la detectabilidad, G es la gravedad y F es la frecuencia de la falla (Bestratén, Oriols, y Mata, 2004). Una vez realizado el diagnóstico e identificadas las fallas y sus parámetros asociados se utilizó un mapa de calor para identificar los sistemas o componentes que se encontraban más comprometidos en el proceso.

3.3 Objetivo 3: Plan de implementación

Para el plan de implementación se utilizó el método inductivo de investigación y de acuerdo a los resultados en la etapa de diagnóstico se plantearon medidas correctivas y oportunidades de mejora para cada una de las plantas en estudio.

Se hizo uso de tablas y diagramas para esquematizar la información de cada planta, de forma que los fallos identificados por medio de la metodología AMFE cuenten con un plan de acción relacionado, el cual incluye medidas correctivas y preventivas, además de recomendaciones y oportunidades de mejora continua. En la Figura 13 se observa el procedimiento para desarrollar el plan de implementación.

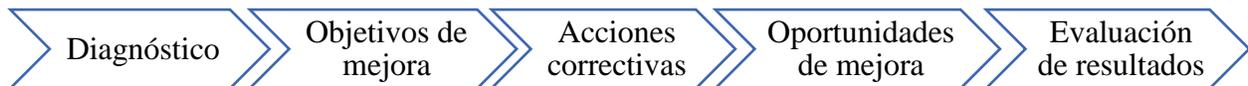


Figura 13. Procedimiento para desarrollar plan de implementación.

4. RESULTADOS

En la Figura 14 se muestra el esquema seguido para la presentación de resultados desarrollados en el proyecto.

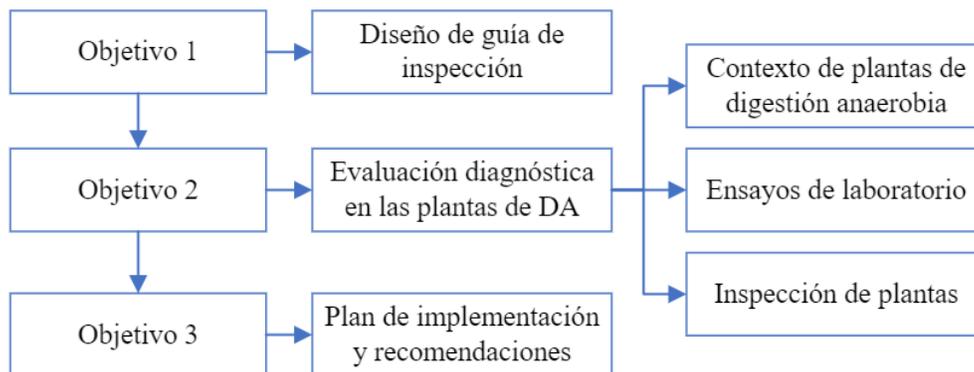


Figura 14. Esquema de división de resultados según los objetivos propuestos.

4.1 Diseño de la guía de inspección

El diseño de esta herramienta de guía de inspección fue basado y elaborado en las necesidades encontradas para las plantas de digestión anaerobia a lo largo de la revisión bibliográfica. Cada una de las secciones contempladas en la guía muestran una etapa, sistema o componente del proceso de producción de biogás que puede presentar vulnerabilidad y afectar el curso correcto del sistema.

Se desarrolló una interfaz de usuario intuitiva y amigable al usuario que permite registrar y visualizar los datos de inspección de manera eficiente. Como estrategia de diseño, se elaboró un cuadro de mando principal (Figura 15) para que se pueda acceder a la herramienta con mayor simplicidad y se obtenga una adecuada gestión de información referente al proceso de producción

de biogás. Las once secciones de la herramienta se muestran en la Figura 15 y son: 1) información general, 2) instalaciones físicas, 3) caracterización de afluente y efluente, 4) sistema de quema de biogás, 5) sistema de calefacción y mezclado, 6) sistema de tuberías, 7) sistema de filtrado y regulación de presión, 8) sistema de almacenamiento, 9) gestión de seguridad y riesgos, 10) manejo de sustrato y 11) postratamiento.

En la Tabla A1 hasta la Tabla A11 se muestran los criterios evaluados en las secciones de la guía de inspección. En total esta herramienta cuenta con 184 entradas de información que permitieron realizar el diagnóstico del estado actual de las plantas de digestión anaerobia.



Figura 15. Estructura de menú principal.

Las secciones de información general e instalaciones físicas se encuentran conformadas por datos de identificación de las plantas, generalidades del biodigestor, datos operacionales generales y algunas características de las instalaciones. Todos los criterios evaluados en estas dos secciones se presentan en la Tabla A1 y Tabla A2. Estas secciones brindan información importante relacionada a ubicación, tamaño de la planta, tipo y uso del biodigestor, que ayudan a contextualizar la situación de la planta y sus componentes. Además, las secciones uno y dos permiten entender la situación organizativa que manejan en la planta, evaluando los registros y desarrollo a nivel de documentación, que se vuelve de gran importancia para poder tener control y un adecuado monitoreo dentro de las instalaciones y del proceso en general.

La sección tres relacionada con la caracterización de las afluente y efluente del biodigestor, se compone por un análisis fisicoquímico y el análisis de composición del biogás. Los criterios evaluados en esta sección se pueden consultar en la Tabla A3. El análisis fisicoquímico del sustrato y digestado puede proporcionar una amplia gama de información referente al estado de la biodigestión, en términos de composición del sustrato y digestado. Este tipo de análisis pueden revelar contenido de sólidos, niveles de pH y características específicas de la materia orgánica

como la demanda química de oxígeno. Además, se logró determinar cómo se han transformado los componentes a lo largo del proceso, lo cual brinda datos de eficiencia y estabilidad del biodigestor.

Por su parte, la sección cuatro de la herramienta evalúa parámetros relacionados a los dispositivos encargados de la quema de excedentes de biogás como funcionamiento correcto de la antorcha, tipo de antorcha o quemador, ubicación correcta del dispositivo de quema, materiales y estabilidad correcta de la antorcha y capacidad de quema de biogás. Los criterios evaluados en esta sección se detallan en la Tabla A4. Para todas las plantas de digestión anaerobia la quema de biogás desempeña un papel crucial en términos de seguridad, ya que se evitan acumulaciones de gas inflamable y se logra disminuir el riesgo de explosiones, incendios o formación de atmósferas explosivas. A nivel ambiental, la quema del excedente de biogás permite controlar las emisiones de gases de efecto invernadero, al convertir el metano a dióxido de carbono.

La sección cinco está relacionada con el sistema de calefacción y sistema de mezclado, que influyen directamente en el desempeño del biodigestor y la eficiencia de producción de biogás y evalúa criterios relacionados a la seguridad de operación de los sistemas, control térmico del biodigestor y tipo de mezclado. Es por esto que conocer el estado y características de operación en ambos sistemas puede ayudar a mejorar y mantener las condiciones correctas en la digestión. La totalidad de los criterios evaluados en esta sección se detallan en la Tabla A5.

A su vez, la sección seis contempla las tuberías y accesorios del sistema de trasiego, y evalúa criterios como identificación de tuberías, materiales, funcionamiento de válvulas, presiones de trabajo, hermeticidad y parámetros de diseño en las tuberías y accesorios. Este tema es fundamental debido a que se pueden dar prevención de fugas, reducción de obstrucciones y se puede dar una optimización del flujo. De esta forma se pueden reducir peligros, aumentar eficiencia y mejorar protocolos de inspección. Los criterios evaluados en esta sección se muestran en el Tabla A6.

La sección siete considera el sistema de filtrado y la regulación de presión del biogás, y evalúa funcionamiento de los filtros para purificar el biogás y su mantenimiento, además de la ubicación y funcionamiento de los compresores. De esta manera se puede controlar la calidad final del biogás, eliminación de las trazas de otros gases no deseados, protege los equipos al evitar acumulaciones de partículas sólidas y líquidos dañinos. También se pueden prevenir sobrepresiones y asegurar flujos óptimos de sustrato y biogás. En la Tabla A7 se muestran la totalidad de los criterios evaluados en esta sección.

La sección ocho de la herramienta considera los sistemas de almacenamiento de digestado y biogás, y evalúa el estado y funcionalidad de los medios de almacenamiento, presiones y resistencia de los materiales, funcionamiento de las válvulas de alivio e inspecciones de fugas. Esta etapa de la obtención de biogás es importante debido a que se puede gestionar la producción, y se logra monitorear la cantidad de biogás generado. También es posible optimizar la operación del sistema según la demanda, esto porque al conocer los niveles de almacenamiento la producción se puede ajustar de manera tal que el proceso sea más eficiente, así, además aporta positivamente a minimizar costos operativos. Los criterios evaluados en esta sección se pueden profundizar en la Tabla A8.

La sección nueve de la herramienta contempla puntos relacionados a riesgos con el medio ambiente, salud humana y requisitos básicos de seguridad en plantas de digestión anaerobia como identificación y señalización de zonas peligrosas, existencia de planos y plan de protección de peligros, existencia de peligros eléctricos y mecánicos, existencia de planes de calibración de equipos y riesgos asociados a sustancias químicas y microorganismos. El monitoreo constante de la seguridad operativa en este tipo de sistemas permite una respuesta efectiva y rápida en caso de emergencias, lo cual significa que se logra minimizar daños e interrupciones en la operación de la planta en momentos de crisis. La totalidad de los criterios evaluados en esta sección se pueden profundizar en la Tabla A9.

A su vez, la sección diez de la herramienta considera puntos relacionados al transporte y alimentación, almacenamiento y pretratamiento del sustrato. Se utilizan criterios como condiciones y tiempo de almacenamiento, existencia de tratamiento para sustratos putrescibles, control y monitoreo de gases, control de plagas, materiales de sistema de alimentación y materiales del sistema de transporte. Este es un pilar importante dentro de la digestión anaerobia debido a que la calidad del sustrato puede interferir positiva o negativamente en la eficiencia de producción de biogás. Los criterios utilizados para esta sección se muestran en la Tabla A10.

Por último, la sección once de la herramienta evalúa el proceso de postratamiento del digestado, y se evalúa la cantidad de gases no deseados, el tipo de conversión del digestado y tipo de postratamiento empleado. Este monitoreo es esencial dentro del proceso debido a que se logra eliminar contaminantes y garantizar cumplimiento de estándares, regulaciones o normativas ambientales. Los puntos considerados para evaluar esta sección se profundizar en la Tabla A11.

Cada apartado de la herramienta muestra en la esquina superior izquierda el nombre de la sección que se está evaluando, además cuenta con botones en la parte superior que permiten desplazarse a lo largo de las demás secciones en caso de ser necesario. En la parte izquierda de la interfaz se adjuntaron dos botones que permiten desplazarse al menú principal y a una sección de instrucciones de uso de la herramienta. El botón de menú principal se colocó en todas las secciones debido a que solo desde este menú se puede acceder a las secciones de resumen de resultados y metodología AMFE. En la Figura 16 se muestra un extracto que ejemplifica la visualización de cada sección.

1. Información general		Observaciones	Valor de Gravedad	Nivel de Gravedad
Nombre de la planta	Finca agroecológica Biomonte			
Ubicación Geográfica	Coronado			
Tipo de Biodigestor	Discontinuos (Bolsa)			
Uso del Biodigestor ¹	Manejo de excretas			
Capacidad de generación energética (MWh/año)	-			
Clasificación ²	Pequeña			
Tipo de materia prima ³	Purines			
Modelo de negocio ⁴	Autoconsumo			
Estatus de la planta (Operación actual)	Operativo			
Valor promedio de generación de Biogás (m ³ /día)	44989.00			

Figura 16. Interfaz visual en sección uno de la herramienta desarrollada.

Se implementaron varias funcionalidades clave en la herramienta de inspección, como las gráficas de nivel de cumplimiento y nivel de gravedad. El nivel de cumplimiento se refiere al grado en el que se alcanzan los criterios establecidos en cada sección. Como se muestra en la Figura 17 el 67 % de los parámetros evaluados en esa sección cumplen satisfactoriamente y el 33 % de los parámetros evaluados no cumplen. Asimismo, el gráfico de nivel de gravedad muestra que de la totalidad de criterios evaluados 70 % tienen una gravedad muy baja, 10 % una gravedad moderada y 20 % una gravedad muy alta.

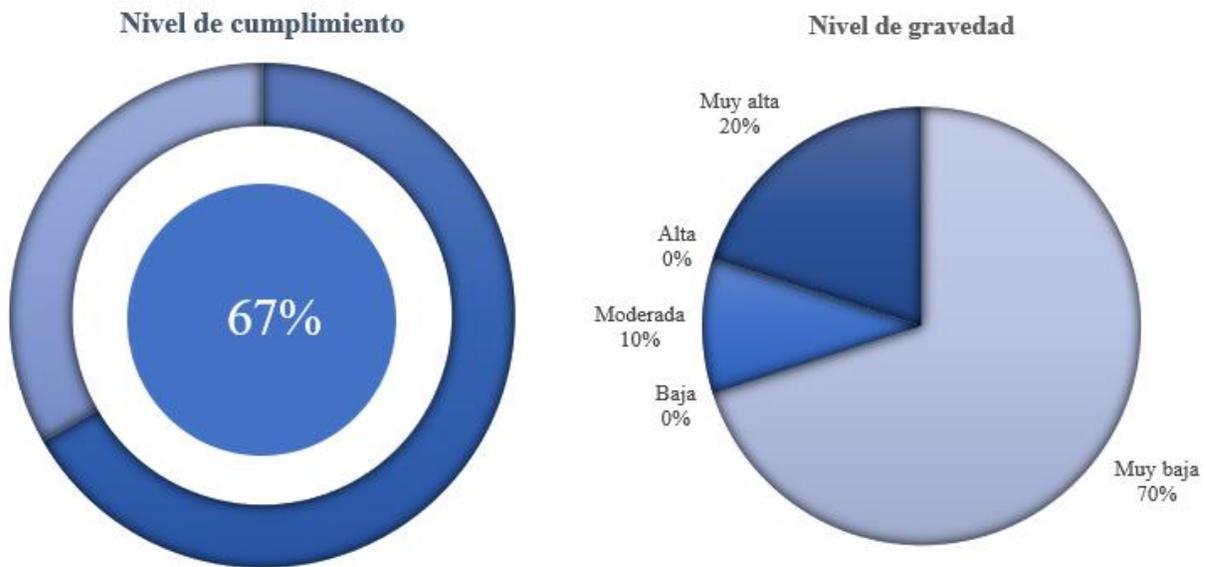


Figura 17. Ejemplo de gráficas de cumplimiento y nivel de gravedad.

Además, estas graficas pueden ser adjuntadas a los informes de inspección, pueden ser utilizadas en la integración con sistemas de gestión de datos existentes y en la personalización de formularios de inspección según las necesidades específicas de cada usuario. Cada sección de la herramienta cuenta con las tablas de clasificación de gravedad, frecuencia y detectabilidad para que el usuario tenga el acceso a esta información dentro de la misma pestaña.

Dentro de la guía de inspección elaborada, se implementó la metodología AMFE para poder identificar las fallas potenciales presentes en las plantas y evaluar riesgos para desarrollar medidas preventivas o procesos de mejora continua. En el proceso de biodigestión, la metodología AMFE puede ayudar a optimizar etapas, priorizar medidas correctivas, incluir mejoras en el diseño del proceso y se pueden introducir controles de calidad que no se tengan contemplados

En la Figura 18 y Figura 19 se muestran las matrices utilizadas para la metodología AMFE, donde se recolecta la información de la etapa u operación a evaluar, el modo, fallo, efecto, además de los valores de gravedad, frecuencia y detectabilidad, esta información permite calcular el NPR y las acciones correctivas de cada criterio. Estas matrices funcionaron para organizar la información del diagnóstico y clasificar las fallas. Para el desarrollo de esta evaluación se realizó únicamente la primera parte de la metodología AMFE; es decir, no se calculó el segundo NPR debido a que las

acciones correctivas fueron propuestas por medio del plan de implementación, mas no fueron ejecutadas.

AMFE proyecto:		AMFE proceso:		AMFE medio:		Componente/parte del proceso:			
Nombre/Dpto:						Nombre coordinador:			
Etapa/Operación	Número fallo	Fallo Potencial				Estado actual			
		Parámetro Indicador	Modo o Descripción de la falla	Efectos	Causa	Frecuencia	Gravedad	Detectabilidad	NPR
									0
									0

Figura 18. Matriz de metodología AMFE antes de acciones correctivas.

Código de identificación:		Hoja:				
		Fecha inicio:				
		Fecha revisión:				
Acción correctiva	Responsable/Plazo	Estado final				Oportunidad de mejora
		Frecuencia	Gravedad	Detectabilidad	NPR	
					0	

Figura 19. Matriz de metodología AMFE después de acciones correctivas.

Para comprender la distribución de parámetros según su gravedad y frecuencia en cada sección, se implementó el uso de un mapa de calor (Tabla 10) que muestra la cantidad de criterios clasificados según su correspondiente calificación. Esta metodología permitió identificar los sistemas o componentes que se encontraban más comprometidos en el proceso de cada planta.

Tabla 10. Diagrama de calor basado en los resultados de la metodología AMFE.

			Sección #				
			Frecuencia (F)				
			Improbable	Posible	Ocasional	Probable	Frecuente
			1	2	3	4	5
Gravedad (G)	Muy grave	5	0	0	0	0	0
	Grave	4	0	0	0	0	0
	Moderado	3	0	0	0	0	0
	Bajo	2	0	0	0	0	0
	Muy Bajo	1	0	0	0	0	0

■ Riesgo bajo
 ■ Riesgo alto
 ■ Riesgo medio
 ■ Riesgo muy alto

4.2 Evaluación diagnóstica en las plantas de digestión anaerobia

El desarrollo del diagnóstico se llevó a cabo utilizando diferentes fuentes de recopilación como la guía de inspección, el trabajo de campo y trabajo de laboratorio. Esta información recopilada a lo largo de las tres visitas realizadas en cada una de las plantas permitió comprender el funcionamiento operativo y el comportamiento de todos los parámetros relacionados al proceso de digestión anaerobia que pueden ser beneficiosos o perjudiciales para una producción eficiente de biogás. Mediante esta evaluación se logró entender cuales plantas cuentan con una producción estable y consistente, y cuáles son las buenas prácticas que permiten este escenario positivo. En la

Figura 20 se observa el modelo de aprovechamiento utilizado al unir la evaluación de los parámetros operativos en campo y en laboratorio.

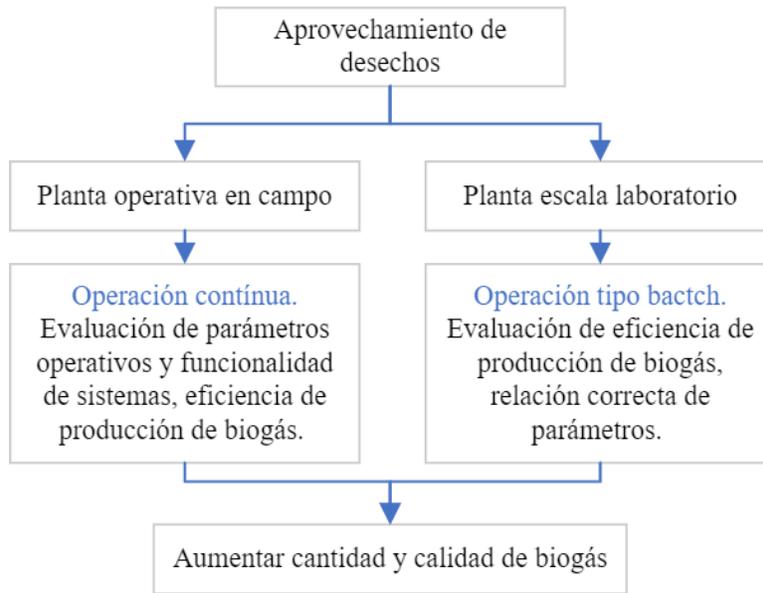


Figura 20. Modelo de aprovechamiento de desechos por medio de diagnóstico operativo.

4.2.1 Contexto de las plantas de digestión anaerobia.

4.2.1.1 Industria cárnica

La planta de digestión anaerobia (Figura 21) se encuentra localizada en la Ribera de Belén, Heredia, Costa Rica. Esta industria está compuesta por una planta de matanza bovina y otra de matanza porcina, y cuenta con una planta de procesamiento de productos cárnicos. La empresa procesa alrededor de 350 bovinos y 590 cerdos diarios, lo que genera un aproximado de 1 250 toneladas de residuos mensualmente. El proceso de sacrificio de ganado bovino y porcino, así como el deshuese y procesamiento de subproductos originan la mayoría de los contaminantes presentes en las aguas residuales generadas por la empresa.

El biodigestor cuenta con 7 años de funcionamiento y la frecuencia de alimentación es diaria; además, el proceso de digestión anaerobia ocurre en una única fase. Esta planta trabaja con desechos agroindustriales principalmente con sangre de cerdo, desecho de matadero y lodos primarios de la planta de tratamiento.

Los lodos primarios (las grasas separadas en el sistema de separación de partículas sólidas, grasas y aceites (DAF)), se conducen a un tanque de almacenamiento a través de un sistema de tuberías. El desecho del matadero se divide en contenido ruminal y excretas, los cuales son partes del sistema digestivo de los rumiantes. Además, se utilizan los sólidos del tamiz verde, constituidos por las excretas del lavado de los corrales. Estos desechos también se transportan por tuberías directamente al tanque de almacenamiento donde se depositan los lodos primarios. Por último, la

sangre de los cerdos se transporta mediante tanquetas hasta la planta y se inyecta directamente al biodigestor.



Figura 21. Planta de digestión anaerobia de la industria cárnica.

El biodigestor es de acero inoxidable, tiene un diámetro de 25 metros y una altura de 7,5 metros, su capacidad de almacenamiento es de 3 191 m³. Cuenta una membrana doble con las mismas dimensiones del tanque, que sirve como reservorio para el biogás generado. Además, el biodigestor cuenta con tres mezcladores, un sistema de calefacción que utiliza un intercambiador de calor externo y un aislamiento térmico para mantener la temperatura ideal en su interior.

Desde el tanque de almacenamiento hasta el biodigestor se conduce el sustrato por medio de un sistema de bombeo. Luego del proceso de biodigestión los lodos resultantes se conducen hasta el tanque de almacenamiento de digestado y luego al clarificador pequeño de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Para la separación de la fase líquida y sólida de este digestado se utiliza una filtro prensa, después el efluente separado se bombea al tanque de homogenización de la PTAR y la fracción sólida se envía a postratamiento para su respectivo compostaje.

4.2.1.2 Industria palma aceitera

La planta de digestión anaerobia (Figura 22) se encuentra localizada en Laurel, Puntarenas, Costa Rica. El biodigestor cuenta con 10 años de funcionamiento y trabaja con desechos agroindustriales provenientes del proceso de extracción del aceite de palma. La frecuencia de alimentación es diaria y el proceso de digestión anaerobia se da en dos fases, debido a que la etapa de acidificación ocurre fuera del biodigestor.

En esta planta inicialmente, el agua residual se somete a un proceso de depuración mecánica mediante un tamizado fino y luego se bombea hacia el tanque de homogeneización. En su trayecto hacia el tanque de acidificación, el flujo atraviesa una estación de control de temperatura con

intercambiador de calor, donde la temperatura del agua residual se reduce para que se sitúe dentro del rango óptimo necesario para el proceso biológico.



Figura 22. Planta de digestión anaerobia de la industria de palma aceitera.

El proceso biológico inicia en el tanque de acidificación, donde las bacterias formadoras de ácido reducen en cadenas cortas de ácidos orgánicos los componentes del agua residual. Posteriormente, el agua acidificada se dirige hacia el reactor anaerobio, el cual está dividido en dos estaciones: carga alta y carga baja. El agua proveniente del tanque de acidificación ingresa primero a la estación de carga alta y luego fluye hacia la estación de carga baja.

Ambas estaciones del reactor anaerobio están cubiertas con una membrana especial de plástico, bajo la cual se almacena el biogás producido. Este gas se extrae mediante sopladores, se desulfura con ayuda de un sistema de filtrado y se utiliza en una unidad de cogeneración para generar electricidad.

El último paso de la estación anaerobia es un clarificador, que actúa como separador de láminas, destinado a retener la biomasa en el reactor anaerobio, posteriormente el agua tratada anaeróticamente fluye hasta un tanque intermedio. El lodo anaerobio se deposita en el fondo del clarificador y se devuelve a la estación de carga baja, denominándose lodo de recirculación. Si es necesario, el exceso de lodo puede descargarse en una laguna de lodos. Además, la corriente de agua se recircula constantemente por gravedad desde la clarificación hasta la estación de carga alta, lo cual es esencial para mezclar el tanque de carga alta en momentos de escasez o ausencia de agua residual de entrada.

4.2.1.3 Industria vacuna

La planta de digestión anaerobia (Figura 23) se encuentra localizada en Coronado, San José, Costa Rica. En esta planta se trata las excretas bovinas y aguas residuales del puesto de ordeño. El

biodigestor cuenta con 4 años de funcionamiento, su frecuencia de alimentación es diaria y el proceso de digestión anaerobia se desarrolla en una única fase.



Figura 23. Planta de digestión anaerobia de la industria vacuna.

Este biodigestor es utilizado para el manejo de excretas y descontaminación de aguas, asimismo el gas generado se utiliza ocasionalmente para cocción de alimentos y para un sistema de calefacción. Los desechos utilizados en este sistema son provenientes de una cantidad de 8 bovinos que producen en promedio 0,4 toneladas de excretas diarias y son ordeñados dos veces al día.

La materia prima en este sistema se recolecta por medio de canales y sistema de tuberías, y se utiliza el efecto de la gravedad para conducir los sustratos hasta los tanques de almacenamiento. Una vez en estos tanques se da un pretratamiento por medio de separación de sólidos para todas aquellas partículas u objetos de mayor tamaño.

Desde los tanques de almacenamiento se conduce el sustrato hasta el biodigestor donde ocurre todo el proceso biológico. El gas generado se transporta por medio de tuberías hasta el sitio donde es utilizado. Por su parte, el efluente generado se conduce hasta otro tanque de almacenamiento para su posterior uso en los pastos y cultivos de la misma finca agroecológica.

4.2.1.4 Industria avícola

La planta de digestión anaerobia (Figura 24) se encuentra localizada en Orotina, Alajuela, Costa Rica. En esta planta se trata las aguas residuales y residuos sólidos provenientes de una granja avícola. Esta industria está compuesta por una granja avícola con 92 000 gallinas ponedoras, las cuales generan alrededor de 87 000 huevos al día y 5,6 toneladas de desechos diarios. El biodigestor es alimentado con desechos agroindustriales como excremento avícola, trazas de alimento avícola, plumas, huevos y cáscaras de huevo.



Figura 24. Planta de digestión anaerobia de la industria avícola.

El sustrato es recolectado por medio de bandas transportadoras y colocado en un centro de acopio. Desde aquí con ayuda de un tornillo sin fin el material es transportado hasta un tanque donde se da una separación de sólidos, las partículas de mayor tamaño son removidas y el resto de material es enviado a un extrusor. Una vez realizado el pretratamiento, el sustrato es enviado por medio de un sistema de tuberías y con ayuda de la gravedad hasta el biodigestor donde inicia el proceso biológico. Luego de este proceso el digestado se lleva a campo para ser aplicado a los pastos. El biogás generado se utiliza en una casa de habitación para consumo diario, sin embargo, al ser una cantidad de biogás muy alta el restante se debe quemar por medio de una antorcha.

4.2.1.5 Caracterización de entradas y salidas para plantas en estudio

En la

Tabla **II** se muestran los datos promedio obtenidos para la caracterización de las muestras frescas para las plantas en estudio. En la Tabla B1 se pueden profundizar la totalidad de los datos obtenidos para este análisis, y se puede observar la variabilidad para los datos entre repeticiones.

Tabla 11. Caracterización promedio de muestras frescas para las plantas en estudio.

Planta	Muestra	ST (mg/L)	SV (mg/L)	SV/ST (%)	ST (%)
Industria cárnica	Entrada	44 886	38 453	86	4,65
	Salida	28 869	23 630	82	2,97
Industria palma aceitera	Entrada	19 944	15 929	80	2,04
	Salida	9 624	5 214	54	1,00
Industria vacuna	Entrada	1 467	924	63	0,15
	Salida	2 514	1 579	62	0,83
Industria avícola	Entrada	53 838	35 967	67	5,46
	Salida	21 539	11 558	54	2,29

Según Durán (2020) la relación SV/ST en el inóculo es un indicador de la proporción de microorganismos presentes en el medio y puede ser utilizado como un parámetro de calidad. Como se muestra en la

Tabla **II** las relaciones más altas para el inóculo de SV/ST las tiene la industria cárnica con 82 % y la industria vacuna con 62 %. Asimismo, los sustratos con valores mayores en la relación SV/ST fueron la industria cárnica con un 86 % y la industria de palma aceitera con un 80 %.

La relación adecuada de sólidos volátiles y sólidos totales en un proceso de digestión anaerobia puede variar dependiendo de diferentes factores, como el tipo de sustrato, la temperatura de operación y la composición microbiana. Sin embargo, se considera que una relación SV/ST entre 50 % y 70 % es óptima para la digestión anaerobia, estos valores indican que se tiene un alto poder de biodegradabilidad y buen contenido de biomasa activa lo que asegura una adecuada actividad microbiana dentro del biodigestor (Blanco y Peña, 2019). Es importante ajustar esta relación para maximizar la producción de biogás y garantizar un funcionamiento eficiente del proceso de digestión anaerobia

Un incremento en la concentración de sólidos totales puede aumentar la densidad del material dentro del digestor, lo cual puede dificultar la mezcla y la transferencia de nutrientes a los microorganismos. Esto puede disminuir la eficiencia del proceso de digestión. En el caso de la industria cárnica se puede observar que la relación SV/ST excede el rango óptimo. Estas concentraciones elevadas de sólidos totales pueden llevar a la acumulación de compuestos perjudiciales, como ácidos grasos volátiles y amoníaco, lo cual puede inhibir la actividad microbiana y reducir la producción de biogás. Además, para esta planta esto puede incrementar la demanda de energía necesaria para mezclar y calentar el sustrato, lo que lleva a un aumento de los costos operativos del sistema y afectar su viabilidad económica.

Por su parte, la industria avícola, vacuna y palma aceitera presentaron valores óptimos para la relación SV/ST para el inóculo. Se espera que, en un biodigestor funcional, la cantidad de sólidos totales y sólidos volátiles en el sustrato inicial se reduzca considerablemente. Esta reducción, que debería ser del 50 % o más e indica que los microorganismos presentes están descomponiendo eficientemente la materia orgánica y produciendo biogás (Giron, 2023). Es crucial monitorear regularmente la concentración de sólidos en el efluente del biodigestor para evaluar su rendimiento y realizar ajustes según sea necesario. Una reducción insuficiente de sólidos puede señalar problemas en el proceso de digestión, los cuales podrían necesitar modificaciones en las condiciones de operación del biodigestor para mejorar su eficiencia.

En la

Tabla **II** se muestra que el porcentaje de sólidos totales para la entrada en la industria de palma aceitera fue de 2,04 %, en la industria vacuna de 0,15 %; y en la industria cárnica e industria avícola se presentaron los mayores porcentajes de ST con un valor del 4,65 % y 5,46 %, respectivamente.

Según la FAO (2019) la carga máxima permisible en el efluente de un biodigestor es de 8 % ST diarios, sin embargo, el correcto funcionamiento se presenta alrededor de un 2 % de ST. En relación con lo anterior, la planta que mantuvo mejores valores de ST fue la industria palma aceitera, las demás plantas presentaron valores muy altos o bajos de ST.

Estos valores son importantes en el proceso de digestión anaerobia debido a que se debe respetar una relación inóculo/sustrato dentro del biodigestor. De esta manera los sustratos que son difíciles de degradar, principalmente por su contenido de materia orgánica excesivo, necesitan una relación mayor a 4. Aquellos sustratos que son más fáciles de degradar, porque poseen un contenido de materia orgánica fácilmente degradable, requieren relaciones menores a 1 (Ortiz y Carvajal, 2023).

En la Tabla 12 se detallan los valores de demanda química de oxígeno obtenidos para las muestras frescas de las plantas en estudio. Como se puede observar todas las plantas mostraron una disminución importante en DQO desde el momento en que ingresa el sustrato a la planta hasta el momento en que sale. Este es un indicativo de que las plantas están teniendo una degradación de la materia orgánica eficiente, asimismo, esto puede indicar que existe una fuerte conversión de materia orgánica a biogás (Giron, 2023). En la Tabla B10 se puede profundizar acerca del factor de dilución utilizado en cada repetición para remoción de DQO.

Tabla 12. Datos de DQO para muestras frescas de las plantas estudiadas.

Muestra	Repetición	DQO (mg/L)	Promedio (mg/L)
Industria avícola Entrada	a	63 063	64 582
	b	61 397	
	c	69 286	
Industria avícola Salida	a	12 310	12 420
	b	12 700	
	c	12 250	
Industria palma aceitera Entrada	a	47 187	46 223
	b	46 501	
	c	44 982	
Industria palma aceitera Salida	a	6 870	6 790
	b	6 810	
	c	6 690	
Industria cárnica Entrada	a	71 370	71 100
	b	69 660	
	c	72 270	
Industria cárnica Salida	a	36 260	34 545
	b	32 928	
	c	34 447	
Industria vacuna Entrada	a	3 040	2 653
	b	2 510	
	c	2 410	
Industria vacuna Salida	a	825	752
	b	864	
	c	567	

4.2.2 Ensayos de laboratorio

4.2.2.1 Industria cárnica

En la Tabla 13 se muestra la caracterización fisicoquímica empleada para los PBM en la industria cárnica. La totalidad de los datos generados se pueden profundizar en la Tabla B5. Esta planta presentó una disminución en sólidos totales y volátiles menores al 50 %, en todas las repeticiones. Este es un indicativo de que el proceso de biodigestión no se está desarrollando de la mejor manera, debido a que los microorganismos no están consumiendo la materia correctamente. Este problema se debe principalmente a cambios bruscos en el sistema que hacen que los microorganismos específicos se vean inhibidos por condiciones adversas como aumento de pH, sustancias inhibidoras y carga inorgánica del sustrato.

Tabla 13. Caracterización promedio de ST, SV y pH por visita para PBM realizados a planta de industria cárnica.

Visita	Muestra	ST		SV		pH	
		Inicial (mg/L)	Final (mg/L)	Inicial (mg/L)	Final (mg/L)	Inicial	Final
1	Entrada	9175,56	5737,78	7451,11	3974,44	7,04	7,17
	Salida	5114,44	3848,89	4255,56	3095,56	6,30	7,04
2	Entrada	6514,44	4366,67	5507,78	3600,00	7,03	7,07
	Salida	4895,56	3301,67	4141,11	2678,33	7,15	6,87
3	Entrada	4566,67	3420,00	3463,33	2437,78	8,04	7,16
	Salida	4852,22	3730,00	3756,67	2160,00	8,11	7,49

La Figura 25 muestra la productividad de biogás para los ensayos a lo largo de las 720 horas y la modelación de Gompertz realizada para la industria cárnica. Esta industria no mostró el comportamiento esperado en las curvas de productividad, durante las tres repeticiones es difícil distinguir las fases de latencia, crecimiento exponencial y fase estacionaria, sin embargo, la repetición uno fue la que presentó un mejor comportamiento. Esto se puede deber a varios factores, entre ellos es importante resaltar que los ensayos de PBM tratan de simular las condiciones operativas de un biodigestor de gran escala en un sistema controlado a escala de laboratorio, lo que implica que cambios bruscos dentro del biodigestor van a ser reflejados en los PBM.

Esta industria tuvo la particularidad de cambiar su alimentación durante los meses de recolección de las muestras, este cambio implicó agregar desechos de otros productos cárnicos ya procesados, debido a que su fecha de expiración ya había sido alcanzada. Estos productos por lo general poseen gran cantidad de sustancias inhibidoras que se utilizan como conservantes dentro de ellos, pero que pueden afectar el sistema. Es posible que estos cambios en la planta no hayan sido notorios y al contrario la producción haya aumentado, sin embargo, a escala de laboratorio esto se vio de una forma distinta, al inhibir el proceso de los microorganismos como se muestra en la Figura 25. A su vez, esta es una planta que trabaja con desechos que tienen un tamaño de partícula grande, lo cual puede afectar el desarrollo de las distintas fases de la digestión anaerobia.

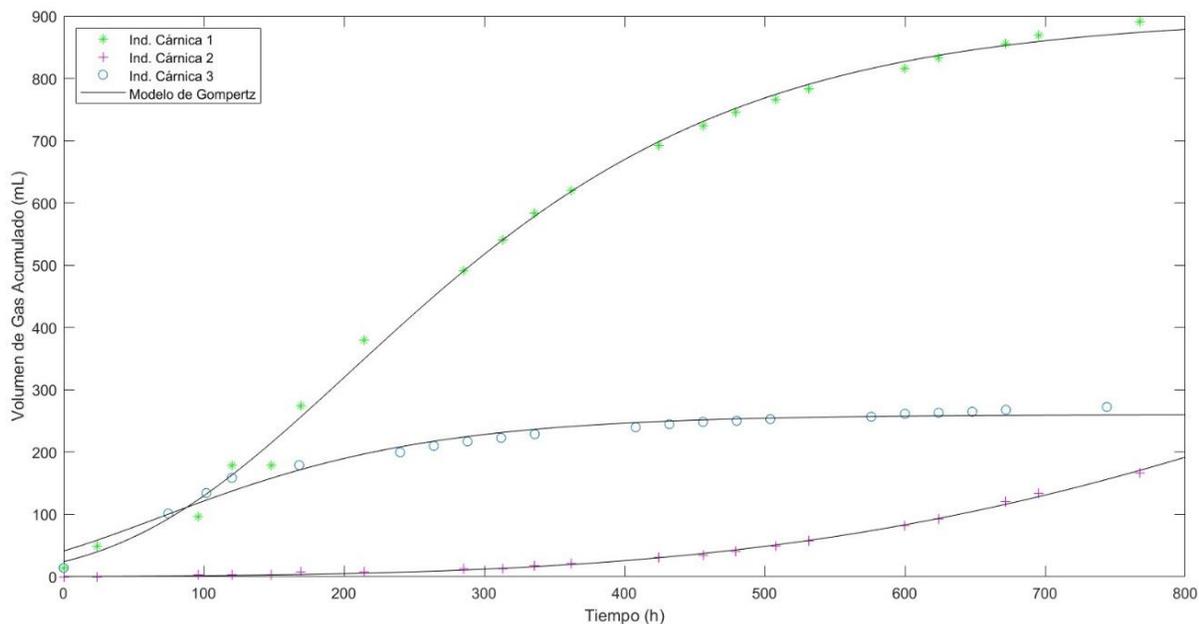


Figura 25. Datos de productividad de biogás y modelación de Gompertz para industria cárnica.

4.2.2.2 Industria palma aceitera

En la Tabla 14 se muestra la caracterización fisicoquímica realizada para los PBM en la industria de palma aceitera. En la Tabla B4 se muestran la totalidad de datos generados. Esta industria presentó mayores reducciones de sólidos totales en todas las repeticiones, pero la reducción de sólidos volátiles fue insuficiente, debido a que no se alcanzó una conversión del 60 % de la materia orgánica volátil presente en el sustrato.

Tabla 14. Caracterización promedio de ST, SV y pH por visita para PBM realizados a planta de industria de palma aceitera.

Visita	Muestra	ST		SV		pH	
		Inicial (mg/L)	Final (mg/L)	Inicial (mg/L)	Final (mg/L)	Inicial	Final
1	Entrada	2343,33	474,44	1925,56	1390,00	6,73	6,89
	Salida	1910,00	35,56	1138,89	1067,78	7,11	7,55
2	Entrada	2136,67	821,11	1884,44	1235,56	7,15	7,06
	Salida	1866,67	417,78	1398,89	1124,77	7,34	7,29
3	Entrada	1982,22	676,67	1806,67	1127,78	7,44	6,86
	Salida	1638,89	305,56	1162,22	1047,78	7,65	7,22

Esta planta mantuvo la tendencia de producción sigmoidea, muy acorde a la cinética de crecimiento bacteriano donde se pueden identificar las tres fases del proceso. Los datos reportados

tuvieron un ajuste y comportamiento acertado, sin embargo, como se observa en la Figura 26 las tres curvas presentaron procesos intermedios de inhibición durante las 200 y 300 horas de lectura.

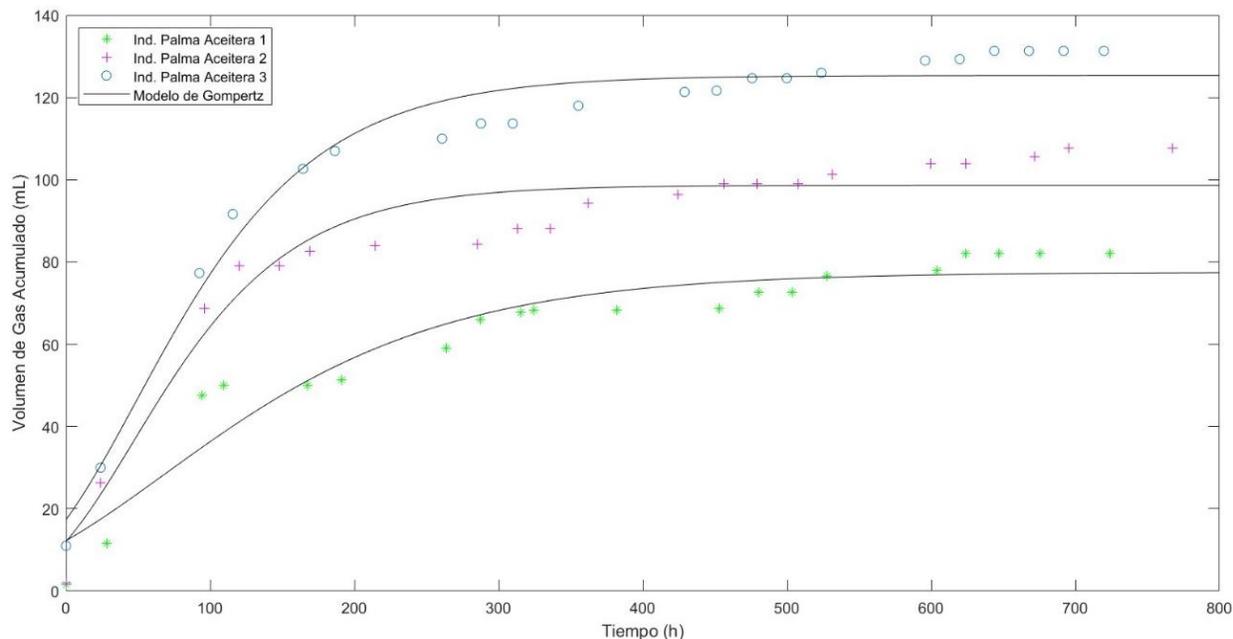


Figura 26. Datos de productividad de biogás y modelación de Gompertz para industria de palma aceitera.

Los valores pH para los PBM de esta planta se mantuvieron cercanos a la neutralidad como se muestra en la Tabla 14, lo cual es beneficioso para que se desarrolle el proceso de digestión anaerobia correctamente. Sin embargo, a nivel planta los valores de pH para la entrada al biodigestor son en promedio de 4,5 como se muestra en la Tabla B6, esto puede propiciar a que se desarrolle un aumento de ácidos grasos volátiles y alarguen los procesos de adaptación microbiana (Giron, 2023). En consecuencia, los buenos resultados mostrados en las condiciones controladas de los PBM con esos valores de pH, no precisamente se van a alcanzar en la planta con los valores de pH tan bajos que presenta el sustrato.

Como se muestra en la Figura 26 bajo condiciones controladas, con proporciones adecuadas de sustrato, a una temperatura ideal y con agitación diaria, el aceite de palma tiene altas tasas de productividad y se puede lograr un desarrollo adecuado del crecimiento microbiano. Esto indica que, con condiciones operativas correctas, la planta de industria de palma aceitera puede obtener mejores rendimientos en cantidad y calidad de biogás. Es importante destacar que este es un sustrato estable con una salud microbiana bien definida lo cual es positivo para que aunado a condiciones operativas idóneas se mejore la eficiencia de la planta.

4.2.2.3 Parametrización de productividad en plantas de escala industrial

En la Tabla 15 se muestran los valores obtenidos para los parámetros de ajuste del modelo de Gompertz a partir de los datos de la producción de biometano para las plantas de escala industrial.

Tabla 15. Parámetros cinéticos de ajuste del modelo de Gompertz para los PBM en las plantas de escala industrial.

Parámetro	Industria Palma aceitera			Industria Cárnica		
	1	2	3	1	2	3
a	77,530	98,670	125,40	900,10	1488,0	260,10
b	1,8440	2,1010	1,9770	3,6200	8,0380	1,8400
c	0,0088	0,0159	0,0140	0,0063	0,0017	0,0088

La eficiencia microbiana (c) resultante de los ajustes es más baja en la industria cárnica, sin embargo, esta planta mantuvo valores de productividad mayores en las tres repeticiones, esto se puede deber a una alta concentración de materia orgánica fácilmente degradable en el sustrato. Por su parte, la industria de palma aceitera presentó menores rendimientos, este comportamiento se puede deber a que el sustrato es difícil de degradar por las bacterias o que contiene un alto porcentaje de materia inorgánica.

En la Tabla B11 se observa que el modelo de Gompertz para la industria de palma aceitera tuvo valores de R^2 de 92, 93 y 97 % en sus tres repeticiones respectivamente. Por su parte, la industria cárnica presentó ajustes de R^2 de 99, 99 y 97 % en las tres repeticiones respectivamente, en ambos casos el modelo de Gompertz es capaz de explicar una gran parte de la variabilidad observada en los datos.

Los resultados obtenidos demuestran que es posible parametrizar los datos de las pruebas de potencial. Esto permite generar índices de operatividad que reflejan el comportamiento biológico del proceso.

4.2.2.4 Industria vacuna

En la Tabla 16 se muestra la caracterización fisicoquímica realizada para las pruebas de potencial de biometano en la industria vacuna. La totalidad de los datos se pueden profundizar en la Tabla B2. Esta industria presentó un consumo de sólidos totales en promedio del 20 % y una disminución del 20 % en los sólidos volátiles.

Según Guillén (2010) un correcto funcionamiento en el biodigestor refleja una disminución similar en sólidos totales y sólidos volátiles. Sin embargo, para esta industria este comportamiento de poca disminución en los ST iniciales y finales, y poca variación en los SV, no fue el esperado y se debe a la presencia de inhibidores en el sustrato y baja calidad de este, ya que contiene un alto porcentaje de líquidos. Además, esta baja disminución en los sólidos totales y la baja reducción en los sólidos volátiles indican que el sustrato contiene una gran cantidad de materia inorgánica y poca materia orgánica, lo cual no es conveniente para un correcto desarrollo de la biodigestión.

Tabla 16. Caracterización promedio de ST, SV y pH por visita para PBM realizados a planta de industria vacuna.

Visita	Muestra	ST		SV		pH	
		Inicial (mg/L)	Final (mg/L)	Inicial (mg/L)	Final (mg/L)	Inicial	Final
1	Entrada	3213,33	2635,56	2316,67	1870,00	6,55	6,65
	Salida	3061,11	2428,89	2290,00	1746,67	6,67	6,72
2	Entrada	1121,11	965,56	835,56	532,22	7,33	6,87
	Salida	607,78	512,22	513,33	356,67	7,18	6,91
3	Entrada	939,56	844,44	539,56	476,67	7,17	7,26
	Salida	670,00	580,00	467,78	392,22	7,14	6,81

Como se muestra en la Tabla 16 esta planta tuvo una fuerte variabilidad en ST y SV entre visitas, esto se debe a la extracción de lodos que se realizó entre las fechas de muestreo por parte de los operarios con el fin de inocular otro biodigestor. Esto refleja el alto impacto que puede generar en el sistema extracciones poco controladas y que se deben tomar medidas adecuadas de operación para que no sufra cambios a nivel microbiológico que vayan a afectar la producción de biogás.

Por otra parte, esta industria presentó valores de pH cercanos a la neutralidad lo cual es beneficioso para un correcto desarrollo de la biodigestión. En la Tabla B7, Tabla B8 y Tabla B9 se pueden profundizar los datos totales de pH para cada repetición en esta planta.

En la Figura 27 se muestra los datos de productividad de biogás y el ajuste del modelo de Gompertz obtenidos a lo largo de los 30 días de medición para la industria vacuna. La repetición que mostró un comportamiento de curva adecuado fue la número dos, debido a que se pueden notar las fases de latencia, crecimiento exponencial y fase estacionaria del proceso.

Por su parte, las repeticiones uno y tres, no presentaron el comportamiento de la curva esperado, esto se debe a que los microorganismos no se adaptaron al entorno en la fase de latencia, en consecuencia, no se desarrolló la fase exponencial y fase estacionaria. Este es un sistema que sufre mucho impacto con pequeños cambios que se realicen en la operación debido a la deficiente calidad en el sustrato que utiliza y a la alta dependencia del digestado para generar el biogás.

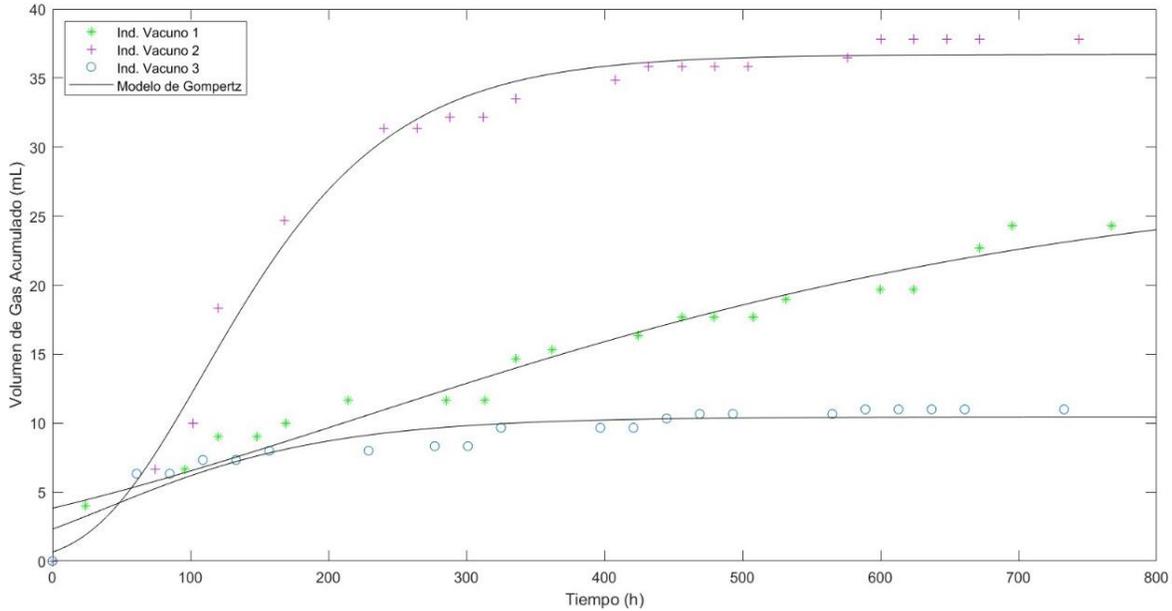


Figura 27. Datos de productividad de biogás y modelación de Gompertz para industria vacuna.

4.2.2.5 Industria avícola

La Tabla 17 muestra la caracterización fisicoquímica realizada para las pruebas de potencial de biometano en la industria avícola. La totalidad de los datos generados se pueden consultar en la Tabla B3. Esta planta presentó una disminución de sólidos baja para todas las visitas, los sólidos totales y sólidos volátiles no alcanzaron el 50 % de disminución.

Tabla 17. Caracterización promedio de ST, SV y pH por visita para PBM realizados a planta de industria avícola.

Visita	Muestra	ST		SV		pH	
		Inicial (mg/L)	Final (mg/L)	Inicial (mg/L)	Final (mg/L)	Inicial	Final
1	Entrada	15151,11	10704,44	8995,56	4979,57	8,39	8,14
	Salida	2742,22	2647,78	1325,56	1224,44	8,41	8,27
2	Entrada	5073,33	4096,67	2882,22	1841,11	8,38	8,07
	Salida	4020,00	3636,67	2260,00	1621,11	8,42	8,20
3	Entrada	5022,22	4056,67	2507,78	1865,56	8,27	8,11
	Salida	3738,89	3456,67	1765,56	1607,78	8,33	8,23

La disminución deficiente en sólidos es un comportamiento esperado, debido a las características del sustrato utilizado en esta planta, ya que la gallinaza es altamente compleja dado que tiene un alto porcentaje de nitrógeno, carbonato de calcio y desechos de gran tamaño como las plumas. Aunado a las características anteriores, el sustrato posee una relación líquido/sólido deficiente, ya que tiene una mayor proporción de sólidos que líquidos.

Como lo muestra Carhuacho, Ramírez, y Guerrero (2014) en su estudio, en la biodigestión los altos contenidos de nitrógeno favorecen a la inhibición del proceso de biodigestión debido a que el sistema puede llegar a colapsar, además la relación C/N se desestabiliza. Por su parte, el carbonato de calcio puede llegar a disminuir el volumen útil del biodigestor por acumulación en el fondo. Asimismo, las plumas pueden colapsar el sistema y favorecer procesos de inhibición.

Esta planta tiene la particularidad de contar con niveles de pH muy alcalinos que rondan entre 8 y 8,5 (Tabla 17), esto se debe a la naturaleza del sustrato. Los niveles de pH en este biodigestor también están directamente asociados a la cantidad de sólidos en el sustrato, en este caso si esta planta realiza una rectificación en la mezcla de líquido/sólido podría mejorar ambos parámetros operativos.

Como se muestra en la Figura 28 el comportamiento de la curva para la industria avícola no es el esperado para las repeticiones 2 y 3, debido a que la fase lag del proceso de digestión anaerobia se extendió a lo largo de las 720 horas del ensayo. Asimismo, se puede observar en la Figura 28 que la primera repetición de esta planta fue la que presentó mejores valores de producción de biogás y una curva de crecimiento más estable.

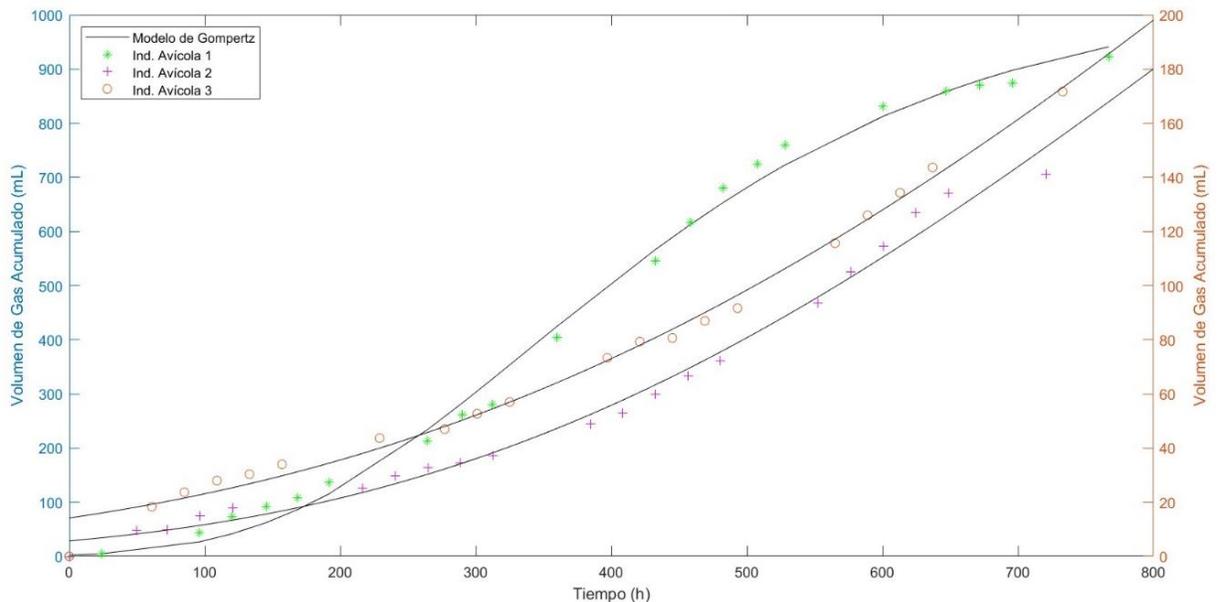


Figura 28. Datos de productividad de biogás y modelación de Gompertz para industria avícola.

Según los datos mostrados en la Tabla 17 y la Figura 28, el desarrollo de la biodigestión para esta planta aún en las condiciones controladas de los PBM es adverso, debido principalmente al sustrato. A nivel planta se está sobrealimentando el sistema y se están generando condiciones aún menos eficientes, lo que impulsa mayores procesos de inhibición en las bacterias metanogénicas, esto concluye en una disminución en la cantidad y calidad del biogás debido a que se desarrollan otros procesos como fermentaciones, sulforeducciones y procesos nitrogenados.

4.2.2.6 Parametrización de productividad en plantas de escala mediana

En la Tabla 18 se muestran los valores obtenidos para los parámetros de ajuste del modelo de Gompertz a partir de los datos de la producción de biometano, para las plantas de escala mediana. Donde los parámetros a, b y c en la repetición uno de la industria avícola presentaron los mejores resultados, principalmente en eficiencia microbiana la cuál superó a la repetición dos y tres por un 32 % y 22 % respectivamente.

Tabla 18. Parámetros cinéticos de ajuste del modelo de Gompertz para PBM en las plantas de escala mediana.

Parámetro	Industria Avícola			Industria Vacuna		
	1	2	3	1	2	3
a	1043,0	619,80	932,60	28,430	36,720	10,460
b	6,1120	4,6880	4,1870	2,0030	4,0230	1,5070
c	0,0053	0,0017	0,0012	0,0031	0,0128	0,0105

En el sistema avícola destaca que la eficiencia microbiana (c) resultante de los ajustes es más baja que en la industria vacuna. Este comportamiento también se puede observar en la Figura 28, donde se muestra un retraso en el arranque del proceso, este comportamiento también ha sido descrito por Blanco (2009) para la digestión de gallinaza con alta concentración de sólidos. En este estudio los autores estiman que el retraso puede tomar entre 30 a 60 días, y concluyen que el comportamiento se debe a la alta concentración de NH₃ libre en el sustrato, lo cual contribuye a altos tiempos de aclimatación dentro del biodigestor.

La industria vacuna presentó valores de producción máxima baja, sin embargo, son cantidades mayores a las presentadas por Bernal y Orozco (2019) en su estudio. En cuanto a las velocidades específicas (b), la industria vacuna presentó mejores valores que los reportados por Custodio y Santos (2020).

En la Tabla B12 se puede observar que el R² para la industria avícola y vacuna fueron en promedio 99 y 93 %, lo cual indica que el modelo de Gompertz se ajusta a los datos obtenidos, y logró predecir la producción de biogás y degradación de materia orgánica bajo las condiciones existentes. Estos parámetros del modelo de Gompertz permiten generar índices de operatividad que reflejan el comportamiento biológico del proceso, los cuales pueden utilizarse como una herramienta adicional de diagnóstico.

4.2.3 Inspección de las plantas

A partir de la herramienta elaborada se evaluó el nivel de cumplimiento de los factores críticos de operatividad, químicos, microbiológicos y de seguridad aplicables al proceso de digestión anaerobia, estableciendo tres parámetros (cumple, no cumple y no aplica). La herramienta permitió determinar el estado de los equipos y componentes utilizados en el proceso de digestión anaerobia, como el biodigestor, agitadores, sistemas de suministro y extracción de biogás, sistema de tuberías y el sistema de calentamiento.

4.2.3.1 Industria cárnica

En las Tabla A1 hasta la Tabla A11 se muestran los criterios operativos evaluados durante la aplicación de la herramienta de guía de inspección. Las gráficas a continuación muestran el cumplimiento y no cumplimiento de los parámetros establecidos en la guía de inspección.

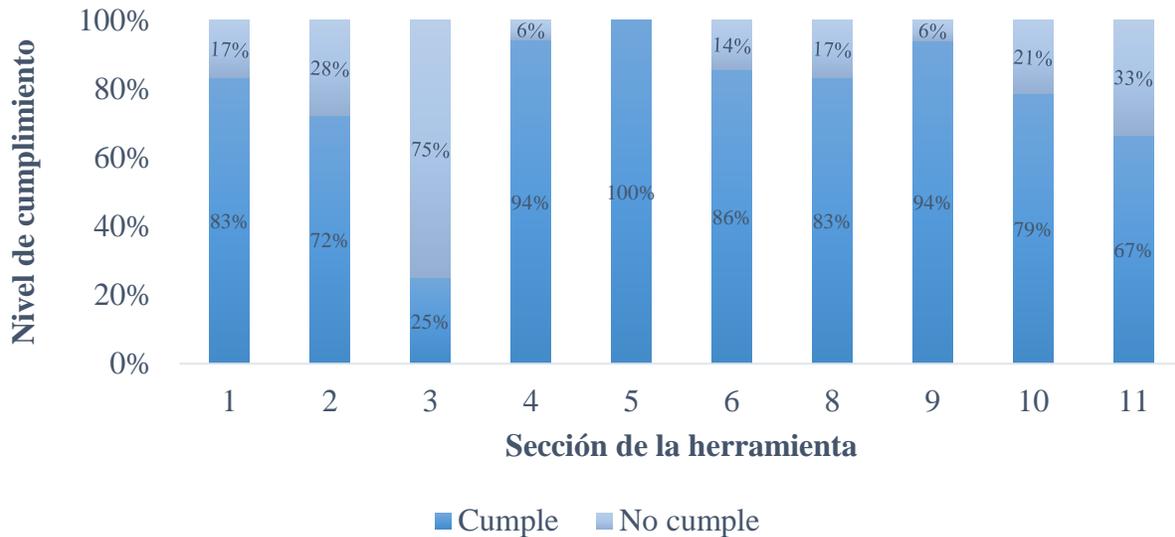


Figura 29. Nivel de cumplimiento por sección para planta industria cárnica.

Como se puede observar en la Figura 29, la industria cárnica presentó un rango de cumplimiento superior a 60% a lo largo de las once secciones evaluadas, a excepción de la sección tres que presentó un nivel de cumplimiento de 25 %. Esta fue la planta de digestión anaerobia que mejores resultados obtuvo a lo largo de la evaluación. Esta planta posee la particularidad de contar con un sistema operativo y de documentación, bastante robusto y bien organizado. A pesar de esto, la planta aún cuenta con oportunidades de mejora que pueden ser aplicadas para aumentar la eficiencia del sistema.

Las secciones que presentaron un menor cumplimiento fueron la dos (instalaciones físicas) con un 72 %, tres (caracterización de afluente y efluente) con un 25 % y once (postratamiento) con un 67 %. En la sección 2 se nota que el bajo nivel de cumplimiento se debe a que no se tiene un filtro de H₂S operando en correctas condiciones. Además, se encontró en esta sección que no se cuenta con un sistema de automatización de válvulas en general (se realiza de manera manual), la automatización de válvulas controla el flujo de sustancias a lo largo de la planta, pudiendo optimizar el proceso, evitar rebalses y un mejor control a nivel de seguridad de la planta.

En la sección tres, se determinaron varios aspectos que son críticos y afectan directamente en la cantidad y calidad de biogás final. Primero, esta planta no cumple con el rango de sólidos totales óptimo para que se dé una correcta biodigestión (deseado de 2 % a 4 %), además cuenta con valores elevados de H₂S y CO₂. Estos valores en CO₂ pueden indicar una fermentación incompleta de materia orgánica y la principal causa de este comportamiento es una carga orgánica elevada, lo

cual tiene sentido considerando que la planta posee cantidades de sólidos prominentes. A su vez las elevadas cantidades de H₂S, indican una excesiva actividad bacteriana sulfato-reductora.

Esta planta utiliza su biogás para combustión en calderas, según Xu, Song, Li, Cheng , y Li (2017) cuando el H₂S está presente en el biogás utilizado como combustible en las calderas, puede causar daños significativos a los materiales metálicos, como la corrosión de intercambiadores de calor, tuberías y otros componentes. Este daño puede llevar a una reducción en la eficiencia térmica de la caldera y aumentar los costos de mantenimiento y reparación. Este biogás tiene poca presencia de este compuesto como se muestra en la Tabla 19, pero se considera que concentraciones superiores a 10 ppm pueden ser perjudiciales también porque la actividad de las bacterias responsables de la producción de biometano se ve significativamente inhibida cuando las concentraciones superan los 50 ppm.

Tabla 19. Composición promedio del biogás para la industria cárnica.

Gas	Cantidad	Unidad
CH ₄	68,80	%
CO ₂	30,10	%
O ₂	1,10	%
CO	0,00	ppm
H ₂ S	454,00	ppm

En la sección once se determinó que esta planta no realiza ningún tipo de postratamiento para disminuir la presencia de CO₂ en el biogás. Esto puede generar implicaciones a nivel de desempeño calorífico del biogás, y debido a que este es el fin del gas generado en este biodigestor, la eficiencia a nivel de caldera debe mejorar al realizar una purificación del biogás.

4.2.3.2 Industria palma aceitera

En la Figura 30 se observa la gráfica de cumplimiento para la industria de palma aceitera. Las secciones que presentaron un menor cumplimiento fueron la sección dos con un 72 % (instalaciones físicas), tres con un 34 % (caracterización de afluente y efluente), seis (sistema de tuberías) con un 57 %, ocho (sistema de almacenamiento) con un 67 %, nueve (gestión de seguridad y riesgos) con un 53 %, diez (manejo de sustrato) con un 64 % y once (postratamiento) con un 67 %. Esta planta a pesar de tener un buen sistema de documentación y registro presenta varias fallas a nivel operativo que afectan directamente a la producción de biogás.

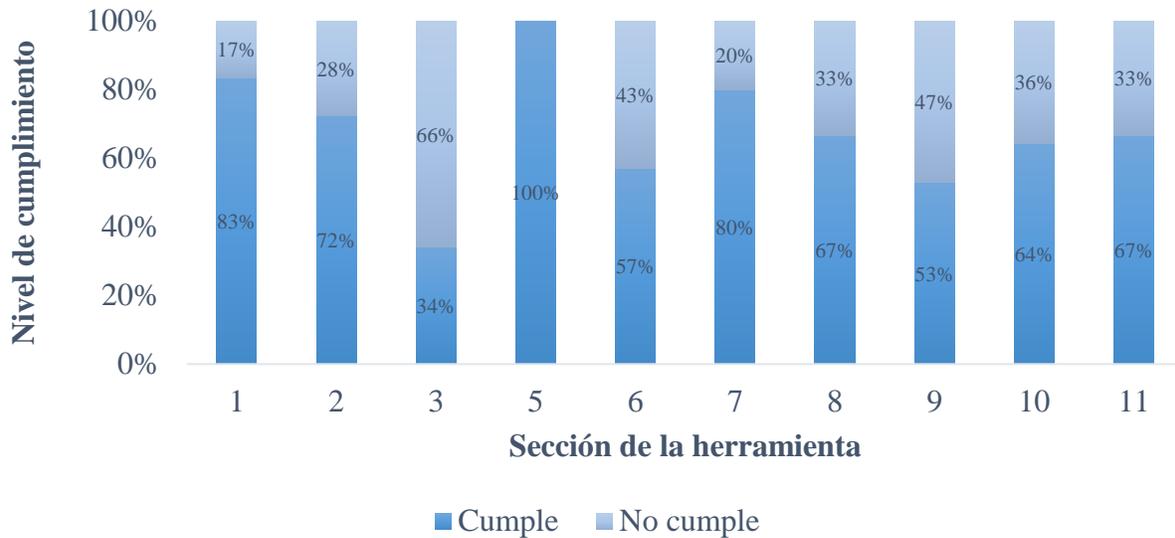


Figura 30. Nivel de cumplimiento por sección para planta industria palma aceitera.

En la sección dos se identificó la ausencia de un plan formal de mantenimiento y calibración para los equipos en esta planta. Esta carencia ha resultado en interrupciones prolongadas en la operatividad de la planta durante los períodos de mantenimiento correctivo. Además, se observó una falta de disponibilidad de repuestos para los equipos considerados críticos, los cuales han experimentado fallas con mayor frecuencia a lo largo del tiempo de funcionamiento del biodigestor.

Esta es una planta que utiliza el biogás para generación de energía eléctrica, por esto es indispensable mantener los valores de H_2S bajos. El equipo utilizado para medición diaria de este compuesto en el biogás se vuelve una clave fundamental para el monitoreo y control del H_2S en el biogás, pero durante el diagnóstico este equipo presentaba una medición errónea de casi el 50 % (comparado con el equipo Multitec 545 de la Escuela de Biosistemas) debido a que no se le da un correcto mantenimiento y calibración.

Asimismo, en esta planta se observó que los operarios necesitan más capacitación en un tema no tradicional en la industria costarricense como lo es la digestión anaerobia. Esta sección dos también mostró que la temperatura de operación para este biodigestor es elevada, a pesar de contar con dos torres de enfriamiento. Por la naturaleza del sustrato, este ingresa a las primeras etapas con una temperatura aproximada de $44\text{ }^{\circ}\text{C}$, aunado a esto las condiciones climáticas de la zona pueden afectar a mantener una temperatura entre los 38 y $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este es un sistema que fue diseñado para operar en condiciones mesofílicas. Sin embargo, por la naturaleza del sustrato esto no se está logrando.

La sección tres de la herramienta mostró que esta planta no cumple con los valores de pH para el sustrato debido a que se mantienen en rangos de 4.5-5.5, aunado a esto la cantidad de H_2S es elevada, dado que alcanza valores cercanos a 1000 ppm como se muestra en la Tabla 20, esto implica alto riesgo de disminuir la vida útil de su generador eléctrico debido a que el H_2S ocasiona problemas de corrosión en componentes internos del motor, válvulas, cilindros y tuberías. También

este gas ocasiona desgaste en componentes como los rodamientos, pistones y las bielas, esto puede llevar a disminuir eficiencia del generador y a aumentar significativamente la frecuencia de mantenimiento de este.

Tabla 20. Composición promedio del biogás para la industria palma aceitera.

Gas	Cantidad	Unidad
CH ₄	61,50	%
CO ₂	30,00	%
O ₂	2,10	%
CO	20,00	ppm
H ₂ S	972,00	ppm

Del mismo modo, el alto contenido de H₂S es un indicador de alta formación y crecimiento de bacterias sulfato reductoras que favorecen el desarrollo de procesos de fermentación dentro del biodigestor. Además, compiten por sustrato con las bacterias metanogénicas, lo cual contribuye a que haya una disminución en la producción de metano, causan fuertes y malos olores, se inician procesos de inhibición y puede llegar a ser altamente tóxico para los operarios.

A su vez, la sección seis mostró que el sistema de tuberías presenta varias falencias, esto se debe a decisiones tomadas desde el momento de diseño. En varios tractos de conducción no es posible realizar mantenimiento a las tuberías debido a que se encuentran subterráneas, las tuberías no se diferencian por colores según el material que transportan; todo lo anterior dificulta la detección de fugas, puntos de falla y reparaciones o mantenimientos.

Aún en caso de contar con planos que indican el tipo de tubería, material que transportan y dirección de transporte, es difícil que se pueda atender una avería si los operarios no comprenden estos documentos, como consecuencia el sistema puede colapsar y llevar a fallas más importantes si no se logra actuar de una manera rápida. Por otra parte, la mayoría de las válvulas en este sistema se encuentran deterioradas y no se les brinda el mantenimiento correcto, lo cual puede llegar a ser fatal para el funcionamiento de la planta.

La sección ocho de la herramienta permitió encontrar que esta planta no cuenta con una estructura de protección para el biodigestor, al permanecer la carpa expuesta al medio se pueden generar problemas de deterioro principalmente por condiciones climáticas.

La sección nueve determinó que esta planta no posee planos de identificación de peligros, plan de protección contra incendios y registro de sustancias peligrosas. A su vez, esta es una planta que posee alto peligro de caídas, cortes y golpes para los operarios. Principalmente cuando deben realizar cambios o mantenimientos al biodigestor, debido a que varios de los equipos se encuentran expuestos y no se cuenta con las condiciones correctas para moverse alrededor o sobre la carpa del biodigestor. Esta planta, además, no cuenta con una antorcha de quema activa.

La sección diez de la evaluación identificó la presencia de fugas y rebalses intermitentes en esta planta. Estos eventos pueden atribuirse a deficiencias en la gestión operativa del biodigestor. Entre las posibles causas recurrentes de este problema se encuentra la sobrecarga del sustrato, que puede

resultar en una capacidad de almacenamiento excedida del biodigestor. Además, la obstrucción de las salidas puede aumentar la presión interna y ocasionar fugas o rebalses en el sistema.

Por último, la sección once determinó que el sistema de filtrado para el H₂S es deficiente en esta planta y no se le realiza un mantenimiento periódico, así mismo, no se realiza postratamiento para el CO₂ lo cual disminuye la calidad del biogás y se puede afectar la eficiencia del motogenerador al contribuir en la generación de depósitos de carbono y corrosión en las partes metálicas.

4.2.3.3 Industria vacuna

En la Figura 31 se muestra el nivel de cumplimiento en la herramienta desarrollada para la industria vacuna. Esta planta fue la que menores niveles de cumplimiento presentó a lo largo de las once secciones, debido a cuestiones de diseño y desempeño a nivel operativo. Al contrario de las otras plantas, esta presentó mejores resultados a nivel de parámetros fisicoquímicos en el afluente y efluente.

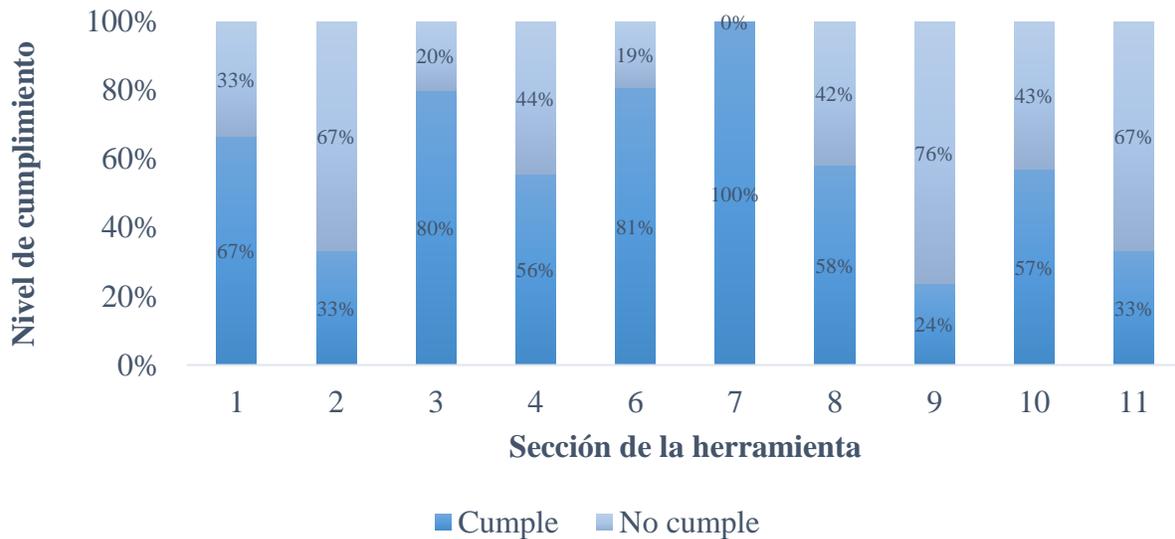


Figura 31. Nivel de cumplimiento por sección para planta industria vacuna.

Con la sección uno de la herramienta se determinó que esta planta no cuenta con un sistema de control de temperatura, de este modo no se tienen aislantes térmicos que permitan controlar los niveles óptimos de temperatura para la digestión anaerobia. Asimismo, la membrana del biodigestor no cuenta con una base de protección que permita evitar daños físicos. Por su parte, la sección dos permitió determinar que se tiene poco control del proceso debido a que no se cuenta con planos de las instalaciones, un mapeo o flujo de proceso, no se da mantenimiento o calibración a los equipos e instalaciones en general y no se cuenta con registro de extracción de lodos.

Con el diagnóstico en la sección tres se logró determinar que la relación de sólido/líquido en el sustrato no es adecuada, debido a que la cantidad de sólidos totales en el sustrato es de 0,15 %, lo cual se considera deficiente. Además, como se muestra en la Tabla 21 la composición del biogás

es buena, principalmente porque se alcanza una cantidad de metano del 72 % y se tiene poca cantidad de H₂S presente.

Tabla 21. Composición del biogás para la industria vacuna.

Gas	Cantidad	Unidad
CH ₄	72,70	%
CO ₂	18,40	%
O ₂	0,00	%
CO	33,00	ppm
H ₂ S	182,00	ppm

En la sección cuatro del análisis realizado con la herramienta, se identificó que el sistema de quema presenta deficiencias en su funcionamiento. Estas carencias se deben a la falta de parámetros de diseño adecuados, incluyendo la falta de cumplimiento de las distancias de separación requeridas con otras estructuras.

Además, se observó que la altura de la salida de la llama de la antorcha no está configurada de manera óptima. Asimismo, se evidenció que el uso y control de la antorcha se realiza de forma completamente manual, lo que implica la necesidad de un monitoreo constante y detallado, el cual no está siendo llevado a cabo de manera adecuada.

La sección ocho del análisis efectuado reveló la ausencia de un sistema de control de olores en esta planta, lo cual reviste importancia considerando su ubicación dentro de un área residencial. Además, se probó la carencia de un mecanismo para el control de plagas, situación que representa un riesgo potencial, ya que cualquier daño físico en la estructura del biodigestor podría resultar en la interrupción del proceso. A su vez, la sección nueve permitió determinar que la planta carece de planos de identificación de peligros, un plan de protección contra explosiones y señalización de prevención y seguridad, además, no se cuenta con un plan de bioseguridad para los operarios y visitantes debidos al riesgo biológico.

En la sección diez de la herramienta se evidenció que esta planta no posee un sistema de tratamiento para sustratos putrescibles. Además, no se cuenta con un adecuado control de la concentración de H₂S, debido a que no se tiene un equipo que permita monitorear constantemente las concentraciones, lo que a su vez puede afectar los tiempos de cambio de los filtros. Por último, la sección once indica que la planta no cumple con el postratamiento para el vertido o reutilización del efluente. Por otro lado, no se realiza ningún tipo de filtrado para la eliminación de CO₂ presente en el biogás final.

4.2.3.4 Industria avícola

En la Figura 32 se muestra el nivel de cumplimiento para la industria avícola, esta planta presentó niveles de cumplimiento bajos en la mayoría de las secciones debido a una deficiente gestión operativa y de funcionamiento de equipos.

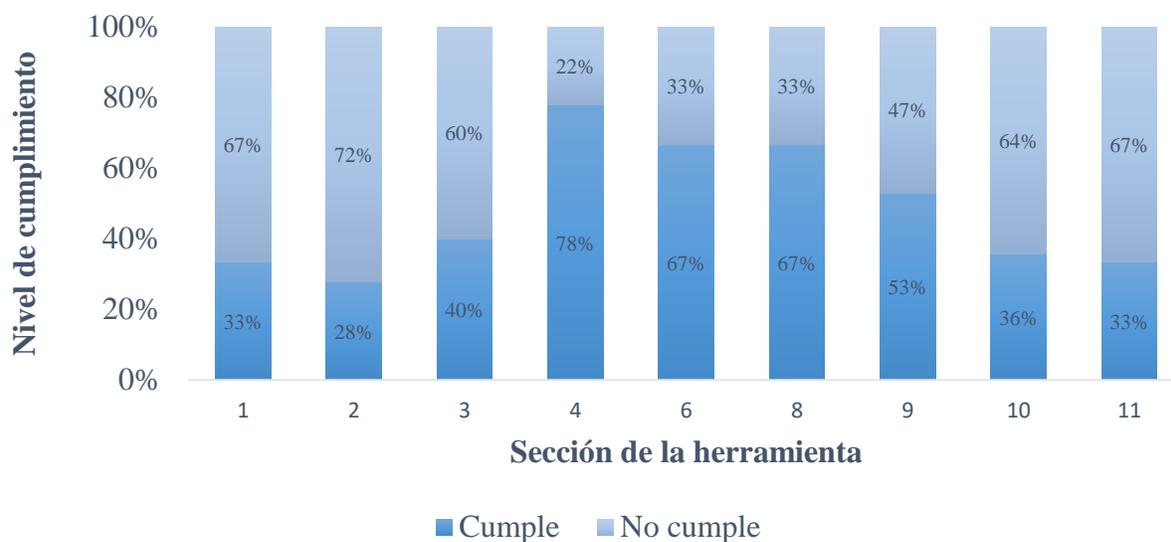


Figura 32. Nivel de cumplimiento por sección para planta industria avícola.

En la sección uno se determinó que esta planta no cuenta con estructuras de protección contra daños externos y materiales que sean resistentes a condiciones climáticas. Esta planta tiene la particularidad de estar rodeada de mucha vegetación, esto implica que se tengan altos riesgos a deterioro de los materiales debido a caída de ramas o árboles, además, por su ubicación también es propensa a daños por roedores o plagas.

La sección dos mostró que este es un biodigestor que no posee sistema de calefacción, además se tiene un control nulo de la temperatura dentro del biodigestor. A su vez, tampoco cuenta con un sistema de mezclado, lo cual puede ser perjudicial para el proceso teniendo en cuenta el tipo de sustrato que se está manejando.

Con el diagnóstico en la sección tres se obtuvo que la cantidad de sólidos totales presentes en el sustrato no es adecuada, esto afecta directamente la eficiencia del proceso de biodigestión, aún más considerando que este biodigestor no posee sistema de mezclado. Además, con esta sección se determinó que los valores de pH del sustrato y el efluente se mantienen fuera del rango correcto. A su vez, las cantidades de H₂S se encuentran elevadas como se muestra en la Tabla 22 y no se realiza ningún método de filtrado para ello. Estos valores de H₂S se deben a que se utiliza un sustrato rico en azufre, esto hace que la descomposición de los compuestos orgánicos sulfurados contribuya a la cantidad del gas presente en el biogás.

Tabla 22. Composición del biogás para la industria avícola.

Gas	Cantidad	Unidad
CH ₄	73,40	%
CO ₂	27,00	%
O ₂	0,00	%
CO	17,00	ppm
H ₂ S	4500,00	ppm

La sección cuatro de la herramienta determinó que la antorcha no cuenta con una altura de salida de llama correcta y que esta antorcha no supe el doble de la producción máxima de biogás. La sección seis mostró que la planta no diferencia por colores las tuberías y no muestra la dirección del flujo. Además, se observa que los materiales empleados en el transporte de sustancias no son los adecuados, y los operarios carecen de conocimiento sobre las presiones operativas habituales y los límites máximos de presión que pueden resistir las tuberías. Esta falta de familiaridad con los parámetros de operación conlleva a una supervisión deficiente y un control insuficiente de posibles fugas en el sistema.

La sección ocho permitió determinar que la carpa de almacenamiento de biogás no posee un plan de protección adecuado, debido a que en sus alrededores hay muchos árboles que puede caerse y dañar la carpa, esta situación se ha dado en ocasiones anteriores y no se han tomado medidas para evitar daños futuros. Además, el sistema de almacenamiento del digestado es deficiente debido a que no cuentan con sistema de control de olores y no cuentan con una estructura impermeabilizada para el almacenamiento de los lodos residuales del biodigestor. Con ayuda de la sección nueve de la guía de inspección se determinó que esta planta no cuenta con plano de identificación de peligros, un plan contra incendios o explosiones y no tienen ningún tipo de señalización de prevención y seguridad. Además, existen peligros por caídas, golpes y cortes, debido a que no existen barandas de contención y muchos de los equipos están expuestos. Asimismo, se evidenció que no se siguen procedimientos, como el uso de equipos de protección personal y la gestión adecuada de residuos peligrosos por parte de los operarios.

La sección diez de la herramienta evidenció que la planta no realiza un correcto manejo de sustrato, esto debido a que no se almacena cubierto de membranas, no se tiene un correcto control de olores, y no se realizan tratamientos para el sustrato que puede llegar a ser putrescible. La sección once mostró que no se realiza ningún tratamiento al digestado para cumplir los parámetros de vertido de la legislación. Además, el sistema utilizado para disminuir la cantidad de H₂S no es completamente efectivo, y no se realiza postratamiento para disminuir el CO₂ presente en el biogás.

4.2.3.5 Distribución de criterios en mapas de calor

En la Figura 33 se muestra la distribución de los criterios evaluados en todas las secciones de la herramienta para cada una de las plantas en estudio, clasificados según la gravedad y frecuencia. Como se puede observar la industria vacuna fue la planta con mayor cantidad de criterios en condición roja, con un total de 28. Por su parte, la industria avícola presentó un total de 21 criterios en condición roja. Asimismo, la industria de palma aceitera presentó un total de 17 criterios en condición roja y, por último, la industria cárnica presentó un total de 3 criterios en condición roja. Esta condición nos indica que los criterios o fallas evaluadas, tienen un alto índice de gravedad y frecuencia dentro del sistema productivo de biogás.

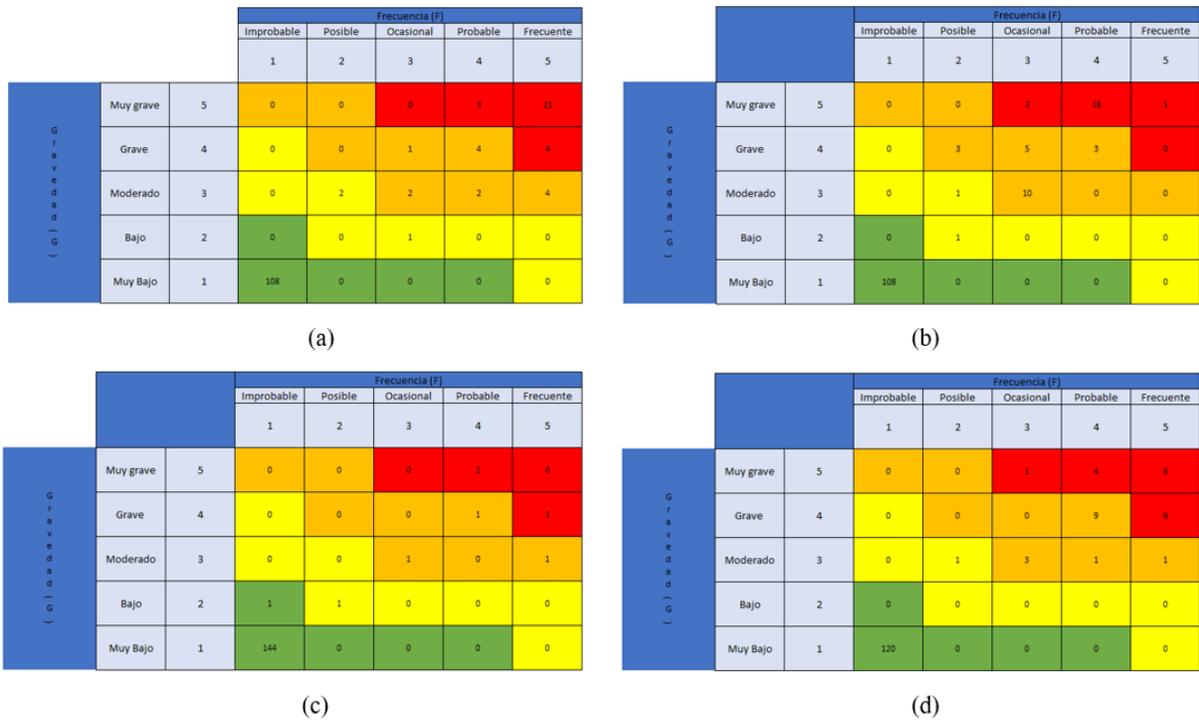


Figura 33. Mapas de calor para las plantas en estudio. (a) Industria Vacuna, (b) Industria Avícola, (c) Industria Cárnica, (d) Industria Palma aceitera.

4.2.3.6 Aplicación de metodología AMFE

El diagrama Ishikawa basado en las 6 m's (Figura 34) permitió determinar los modos y fallos potenciales dentro de los sistemas o componentes del proceso de producción de biogás. Además, se integró la información necesaria para organizar y priorizar estas fallas dentro de la metodología AMFE.

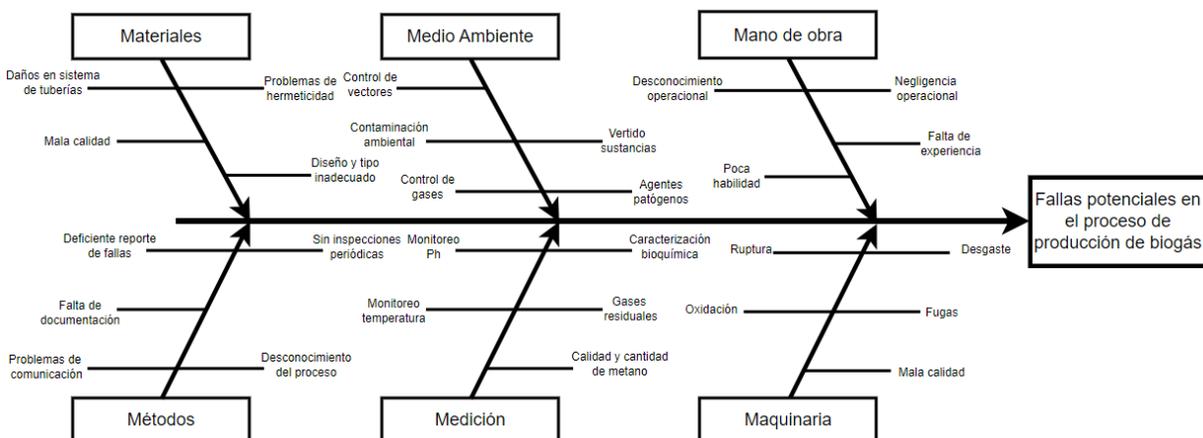


Figura 34. Diagrama Ishikawa implementado en la metodología AMFE de la herramienta.

La metodología de análisis modal de fallos y efectos fue aplicada en las secciones que presentaron un menor cumplimiento. Además, con ayuda de la herramienta de guía de inspección se logró

determinar la gravedad, frecuencia y detectabilidad de las fallas. En la Figura 35 se observa las secciones de la herramienta con fallas potenciales detectadas en cada una de las plantas estudiadas.

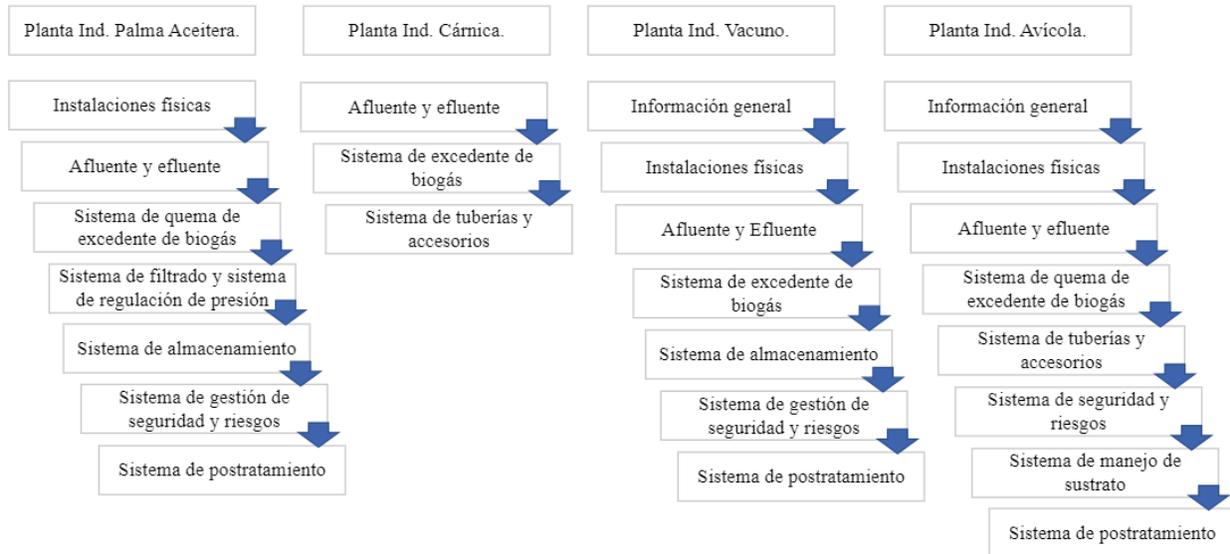


Figura 35. Secciones que muestran fallas potenciales en las plantas estudiadas.

Las plantas con mayor cantidad de secciones afectadas fueron la industria avícola con un total de 22 fallas distribuidas en ocho de las secciones. Sin embargo, obtuvo menor cantidad de fallas que la industria vacuna, la cual tuvo un total de 24 fallas distribuidas en siete de las secciones de la herramienta.

La planta de industria de palma aceitera presentó 16 fallas en siete de sus secciones. Por su parte, la industria cárnica solo tuvo cuatro fallas potenciales, distribuidas en 3 de las secciones de la herramienta. La Tabla 23, Tabla 25, Tabla 27 y Tabla 28 enlistan los modos de fallas detectados para cada una de las plantas en estudio.

Tabla 23. Modos de falla para la producción de biogás en planta de industria vacuna.

# falla	Modo de falla	# falla	Modo de falla
1	Falta de aislantes térmicos y su protección.	13	No se tiene sistema de purga o control de olores.
2	No se cuenta con control de la temperatura.	14	No se cuenta con planos que identifique zonas de peligro.
3	No se cuenta con plano de las instalaciones.	15	No se cuenta con plan de protección contra explosiones.
4	No se cuenta con un mapeo de flujo de proceso.	16	No se cuenta con registro de sustancias peligrosas.
5	No se cuenta registros de extracción de digestado.	17	No se cuenta con señalización de prevención y seguridad.
6	No se realiza mantenimiento y calibración de equipos.	18	Falta de conocimiento y experiencia por parte de los operarios.

Tabla 24. Modos de falla para la producción de biogás en planta de industria vacuna. Continuación.

# falla	Modo de falla	# falla	Modo de falla
7	No se cuenta con un registro de inspecciones.	19	No se cuenta con señalización de equipos y protección adecuada.
8	Cantidad de ST inferiores al 2%.	20	No se cuenta con tuberías identificadas, señalizadas o demarcadas.
9	No se cuenta con dispositivo de control automático de llama.	21	No cuenta con dispositivo que evite retroceso de llama al biodigestor.
10	No se respetan distancias a sitios con riesgo de explosión.	22	No se cuenta con plan de bioseguridad.
11	No se respeta altura permisible para salida de llama de la antorcha.	23	No se cuenta con plano con zona de atmósfera explosiva.
12	No se cierra la válvula de la antorcha de suministro manual o automáticamente.	24	No se realiza postratamiento a efluentes.

La industria vacuna obtuvo valores de NPR elevados en la mayoría de sus fallas potenciales encontradas (Tabla D1). Esto debido a que la mayoría se categorizan con una gravedad alta, frecuencia alta y una baja detectabilidad. Estos resultados implican que esta planta de digestión anaerobia no se encuentra funcionando correctamente y posee grandes oportunidades de mejora.

La planta de digestión de la industria avícola mantuvo valores de NPR más bajos, en un rango de 20 a 60 (Tabla D2). Esto se debe a que la mayoría de las fallas encontradas presentaron frecuencias bajas y una detectabilidad alta. Una ventaja de este comportamiento es que las fallas pueden ser monitoreadas con facilidad una vez que sean corregidas.

Tabla 25. Modos de falla para la producción de biogás en planta de industria avícola.

# falla	Modo de falla	# falla	Modo de falla
1	Falta de protección para aislantes térmicos.	12	Cantidad de H ₂ S perjudicial para el sistema.
2	Materiales de protección no son resistentes a condiciones climáticas.	13	No se respetan distancias a sitios con riesgo.
3	Materiales en contacto con el biogás no son aptos.	14	Antorcha colocada incorrectamente.
4	No se tiene plano de las instalaciones.	15	El quemador solo cubre el 20% de la producción.
5	No se tiene un mapeo de flujo de proceso.	16	No se cuenta con tuberías identificadas con código de color.
6	No se tiene registro de extracción.	17	No se cuenta con tuberías identificadas con código de color.
7	No se cuenta con manual de operación de equipo, no se realiza mantenimiento y calibración de equipos.	18	No se cuenta con plan de protección contra explosiones.

Tabla 26. Modos de falla para la producción de biogás en planta de industria avícola Continuación.

# falla	Modo de falla	# falla	Modo de falla
8	No se documentan inspecciones y resultados.	19	No se tiene control de malos olores.
9	No se elimina vapor de agua presente en el biogás.	20	No se controla la cantidad de H ₂ S presente en el biogás.
10	Valor de pH por debajo de 7.	21	No se cuenta con un control o sistema de tratamiento para sustratos putrescibles.
11	Cantidad de ST superiores al 2%.	22	No se realiza postratamiento a efluentes.

Por su parte, la industria de palma aceitera presentó valores de NPR en un rango de 60 a 75 (Tabla D4), a excepción de las fallas relacionadas al filtrado de H₂S, funcionamiento de la antorcha y mantenimiento de equipos. Las cuales presentaron valores de NPR mayores debido a que son parámetros críticos que afectan la producción y calidad del biogás, y a su vez la seguridad de la planta.

Tabla 27. Modos de falla para la producción de biogás en planta de industria palma Aceitera.

# falla	Modo de falla	# falla	Modo de falla
1	Tiempo de retención hidráulico bajo para sistema mesofílico	9	No se cuenta con planos que identifique zonas de peligro
2	No se realiza mantenimiento y calibración de equipos	10	No se cuenta con plan de protección contra explosiones
3	Valor de pH por debajo de 7	11	No se cuenta con registro de sustancias peligrosas
4	Cantidad de ST superiores al 2%	12	No se cuenta con tuberías identificadas con código de color
5	Cantidad de H ₂ S perjudicial para el sistema	13	No se cuenta con tuberías identificadas, señalizadas o demarcadas
6	No se cuenta con antorcha	14	No se cuenta con seguridad en instalación eléctrica y protección contra rayos
7	Filtro de H ₂ S no funciona	15	No se tienen equipo e instalaciones a prueba de explosiones
8	El biodigestor no cuenta con estructura de protección	16	No se tiene una disminución efectiva de H ₂ S presente en el biogás

Por último, la planta de industria cárnica presentó valores de NPR de 60 en sus cuatro fallas (Tabla D3), debido a que es probable que sucedan y su detectabilidad es media. Estos resultados indican que es una planta que debe mejorar en pocos aspectos, sin embargo, son fallas que podrían generar problemáticas muy severas en el funcionamiento y eficiencia de la planta si no son consideradas a tiempo.

Tabla 28. Modos de falla para la producción de biogás en planta de industria cárnica.

# falla	Modo de falla
1	El quemador solo cubre el 20% de la producción de biogás
2	Cantidad de ST cercanos al 5%
3	Cantidad de H ₂ S perjudicial para el sistema
4	Las presiones alcanzan hasta 3 PSI

Para todas las plantas las fallas se priorizaron en función de la gravedad, frecuencia y detectabilidad. De este modo, los criterios de la herramienta que resultaron con un no cumplimiento, pero que sus valores de gravedad, frecuencia y detectabilidad eran menores, no fueron considerados para aplicar la metodología AMFE. Esto permitió clasificar las fallas según su importancia para poder proponer acciones correctivas a las etapas o componentes que realmente tenían una implicación negativa y directa en el proceso.

En general, la metodología AMFE permitió para las cuatro plantas evaluadas entender en cuales etapas del proceso se podría mejorar y la importancia de monitorear frecuentemente los distintos sistemas involucrados. La mayoría de las fallas detectadas se deben a malas condiciones de diseño, falta de mantenimiento en los equipos y componentes, operación incorrecta de equipos o procesos, funcionamiento deficiente de los equipos y variaciones en la composición o la carga del sustrato.

4.3 Plan de implementación y recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en la sección de diagnóstico y con ayuda de la metodología AMFE, las inconsistencias encontradas en los diferentes sistemas de biodigestión fueron abordadas por medio de un plan de implementación. De esta manera se encontraron alternativas que permitan mejorar la operatividad del sistema, la calidad y cantidad de biogás generado.

Debido a que los sistemas de biodigestión son bastante complejos y considerando que las cuatro plantas en estudio mostraron problemáticas en distintas secciones de la herramienta se realizó un diagrama para la gestión eficiente de sistemas de producción de biogás de manera general como parte del plan de implementación.

Este diagrama (Figura 36) muestra las diferentes razones que pueden afectar la eficiencia de producción del biogás dividido por aspectos operativos, aspectos técnicos y aspectos fisicoquímicos. Además, se puede observar la relación que tienen estos aspectos entre sí y soluciones correspondientes.

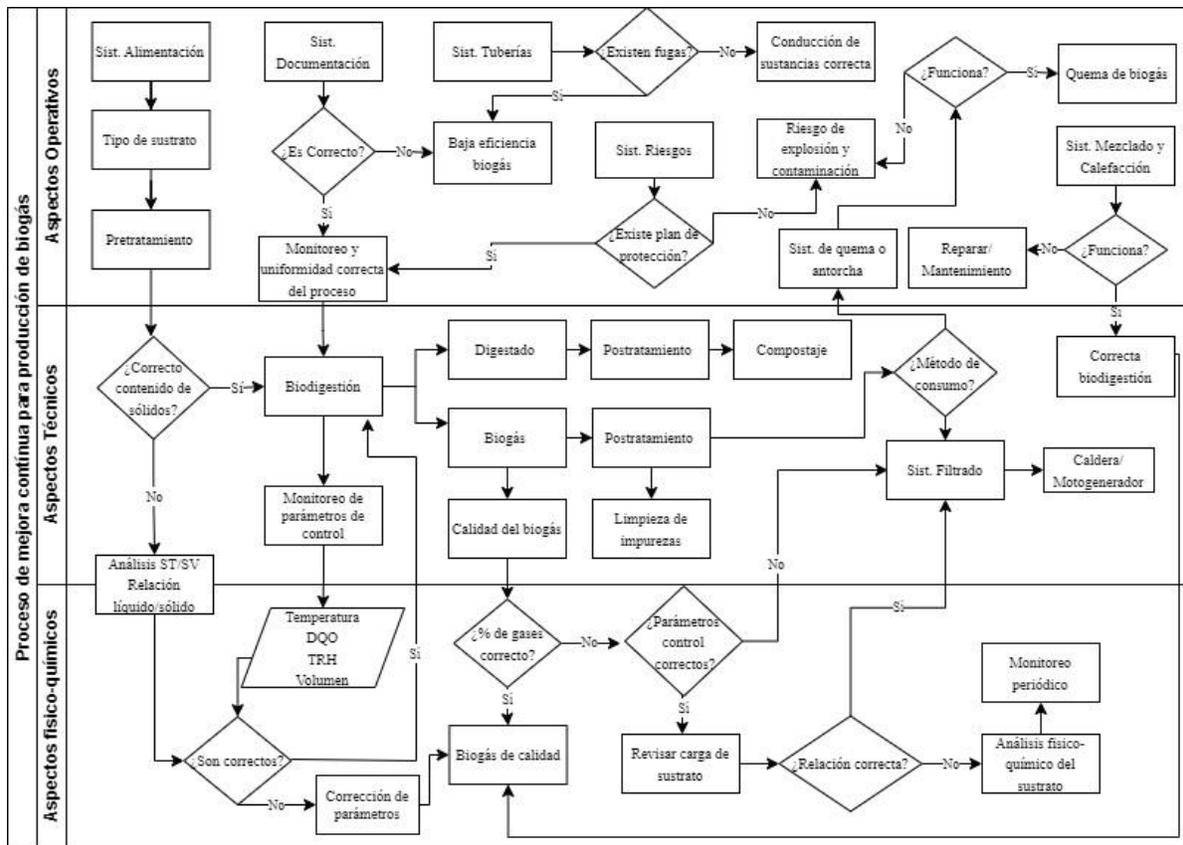


Figura 36. Diagrama de proceso para la gestión eficiente de producción de biogás.

Como parte del plan de acción general para las plantas se propone:

- Implementar un programa de seguridad y salud: un programa de este tipo ayuda a identificar y mitigar los riesgos para el personal de trabajo, puede lograr una reducción de accidentes y lesiones laborales. Asimismo, se puede mejorar la eficiencia operativa y aporta positivamente a reducir costos vinculados a gastos médicos y pérdida de productividad. Para desarrollar este plan se pueden considerar capacitaciones a los operarios, utilizar talleres de motivación, establecer medidas de seguridad estandarizadas, acondicionar las instalaciones para evitar peligros y utilizar medios de información para las personas que visiten la planta como carteles y señalización de alertas.
- Implementación de un plan de mantenimiento: este plan requiere que se identifiquen todos los equipos o componentes que requieran algún tipo de mantenimiento, es importante contar con las características, manuales y condiciones de funcionamiento de cada uno de ellos. Luego de esto por medio de herramientas como Microsoft Excel se puede establecer un cronograma de control para cada equipo donde se especifique la frecuencia de mantenimiento, vida útil, reparaciones realizadas y costo de mantenimiento o cambio.
- Implementación de acciones correctivas: las acciones correctivas (Tabla 29, Tabla 30, Tabla 31 y Tabla 32) y oportunidades de mejora para las fallas identificadas en la metodología AMFE se muestran a continuación:

Tabla 29. Acciones correctivas para industria vacuna.

Sección	Acción correctiva	Responsable
1	Colocar protección para aislantes térmicos	Operario
	Colocar sensor, termocupla o termómetro	Técnico/Profesional
	Elaborar plano detallado de las instalaciones	Técnico/Profesional
	Elaborar un diagrama de flujo del proceso	Técnico/Profesional
2	Registrar procesos de extracción de digestado en una bitácora	Operario
	Elaborar un plan de mantenimiento para equipos	Técnico/Profesional
	Elaborar un plan de monitoreo y documentar inspecciones	Técnico/Profesional
3	Mantener un control de ST ingresando al biodigestor, utilizar proporciones para estandarizar cantidad de sólidos	Operario
	Colocar un sensor que indique cuando la llama está activa	Operario
4	Rediseñar espacios en caso de que exista alto riesgo de exposición	Técnico/Profesional
	Rediseñar antorcha con una altura de llama desde el suelo de al menos 4 m	Técnico/Profesional
8	Diseñar un sistema de control de olores	Técnico/Profesional
	Elaborar un plano con fuentes/zonas potenciales de riesgo	Técnico/Profesional
	Elaborar un plan que integre medidas preventivas ante los posibles riesgos dentro de la planta	Técnico/Profesional
	Elaborar una plantilla para documentar sustancias peligrosas	Operario
	Colocar infografías y carteles de precaución en las zonas necesarias	Técnico/Profesional
9	Dar capacitación a operarios	Técnico/Profesional
	Colocar señalización y protección en equipos, tuberías y tanques de almacenamiento	Operario
	Pintar y respetar código de colores en tuberías	Operario
	Colocar señalización y demarcación visible para tuberías	Operario
	Instalar dispositivo que evite retroceso de llama al biodigestor	Técnico/Profesional
	Elaborar un plan de bioseguridad para operarios y visitantes	Técnico/Profesional
11	Realizar plan de gestión y postratamiento para efluentes	Técnico/Profesional

Como parte de las oportunidades de mejora en la industria vacuna se encuentran:

- Realizar un plan de mantenimiento preventivo y correctivo.
- Realizar inspección diaria de temperatura.
- Manejar un portafolio con documentación importante de la planta.
- Realizar caracterización de entradas y salidas del biodigestor cada 6 meses.
- Dar seguimiento al plan de mantenimiento y cumplir las inspecciones periódicas.
- Llevar un registro de la cantidad de excretas que se produce diariamente.

- Controlar el encendido y apagado de la antorcha.
- Ubicar las tuberías conductoras de biogás y antorcha lejos de zonas de riesgo, como casas o calles.
- Utilizar materiales adecuados y una ubicación alejada de vegetación, calles y edificios.
- Utilizar un filtro para disminuir contaminación por gases y su mal olor.
- Colocar señalización y planos en sitios visibles.
- Dar capacitación a los operarios, delegar una persona encargada para seguimiento.
- Ubicar las sustancias peligrosas en un sitio alejado, con señalización correcta y para un único fin.
- Realizar capacitaciones anuales.
- Realizar inspección periódica de condición de pintura en tuberías.

Tabla 30. Acciones correctivas para industria palma aceitera.

Sección	Acción Correctiva	Responsable
2	Aumentar tiempo de retención hidráulico	Técnico/profesional
	Elaborar un plan de mantenimiento para equipos	Técnico/ profesional
3	Utilizar un pretratamiento para subir niveles de pH	Operario
	Mantener un control de ST ingresando al biodigestor, utilizar medidas para estandarizar cantidad de sólidos	Operario
	Utilizar métodos internos y externos para disminuir cantidad de H ₂ S presentes en el biogás	Operario
4	Realizar la instalación de una antorcha que supla el doble de la producción de biogás	Técnico/ profesional
7	Cambiar filtro o método de filtrado para disminuir H ₂ S en biogás/mejorar condiciones microbianas del biodigestor	Técnico/ profesional
8	Conocer vida útil de membrana, contar con un plan de revisión y mantenimiento para membrana	Técnico/ profesional
9	Elaborar un plano con fuentes/zonas potenciales de riesgo	Técnico/ profesional
	Elaborar un plan que integre medidas preventivas ante los posibles riesgos	Técnico/ profesional
	Elaborar una plantilla para documentar sustancias peligrosas	Operario
	Diferenciar las tuberías de sustratos y biogás con ayuda de pintura	Operario
	Colocar señalización y demarcación visible para tuberías	Operario
9	Colocar un sistema de para rayos y protección para instalaciones eléctricas	Técnico/ profesional
	Disminuir el riesgo de explosión dentro de la planta utilizando buenas prácticas de manufactura y rotulación preventiva	Operario
11	Cambiar filtro o método de filtrado para disminuir H ₂ S en biogás/mejorar condiciones microbianas del biodigestor	Técnico/ profesional

Como parte de las oportunidades de mejora en la industria de palma aceitera se encuentran:

- Realizar experimentos para determinar el efecto del tiempo de retención hidráulico en la disminución de carga orgánica y calidad de biogás.
- Dar seguimiento al plan de mantenimiento y cumplir las inspecciones periódicas.
- Controlar diariamente los valores de pH e implementar métodos de regulación de pH.
- Realizar experimentos para determinar el método más eficiente que permita disminuir sólidos sin afectar el sistema.
- Utilizar equipos para medición diaria de H₂S, realizar cambios operativos dentro del biodigestor para disminuir reacciones que liberan el gas.
- Contar con un plan de mantenimiento para la antorcha.
- Realizar mediciones diarias de H₂S y contar con un plan de mantenimiento para filtro.
- Realizar inspecciones diarias a la membrana, corroborar perfecto estado, verificar que los materiales sean compatibles con los sustratos u gases generados en el proceso.
- Dar capacitación a los operarios, delegar una persona encargada para seguimiento.
- Ubicar las sustancias peligrosas en un sitio alejado, con señalización correcta y para un único fin.
- Colocar la dirección de conducción y el nombre del tipo de material que se transporta en tuberías y corroborar estado de la pintura periódicamente.
- Utilizar diseños llamativos para señalización y demarcación de tuberías.
- Colocar un sistema de para rayos y protección para instalaciones eléctricas.
- Disminuir el riesgo de explosión dentro de la planta utilizando buenas prácticas de manufactura y rotulación preventiva.
- Implementar método de mezclado dentro del biodigestor.

Tabla 31. Acciones correctivas para industria cárnica.

Sección	Acción correctiva	Responsable
4	Cambiar diseño de quemadores / Habilitar recurso de almacenamiento secundario	Técnico/Profesional
3	Mantener un control de ST ingresando al biodigestor, utilizar medidas para estandarizar cantidad de sólidos	Operario
	Utilizar métodos externos para disminuir cantidad de H ₂ S presentes en el biogás	Técnico/Profesional
6	Realizar una revisión periódica en las tuberías que manejan presiones superiores a la que soportan / cambiar tuberías	Operario

Como parte de las oportunidades de mejora en la industria cárnica se encuentran:

- Monitorear consumo de quemadores diariamente. Las válvulas de corte deben estar identificadas y ser de fácil acceso.
- Realizar experimentos para determinar el método más eficiente que permita disminuir sólidos sin afectar el sistema.
- Mejorar monitoreo, recolección y documentación de parámetros operativos.

- Utilizar equipos para medición diaria de H₂S, realizar cambios operativos dentro del biodigestor para disminuir reacciones que liberan el gas.
- Dar seguimiento al plan de mantenimiento y cumplir las inspecciones periódicas.

Tabla 32. Acciones correctivas para industria avícola.

Sección	Acción correctiva	Responsable
1	Colocar protección para aislantes térmicos.	Operario
	Colocar estructura de protección para membrana del biodigestor	Operario
	Cambiar materiales de conducción de biogás, realizar inspecciones diarias del sistema	Operario
2	Elaborar plano detallado de las instalaciones	Técnico/Profesional
	Elaborar un diagrama de flujo del proceso	Técnico/Profesional
	Registrar procesos de extracción en una bitácora	Operario
	Elaborar un plan de mantenimiento para equipos	Técnico/Profesional
	Elaborar un diagrama de flujo del proceso	Técnico/Profesional
3	Colocar trampas de condensado para evitar obstrucción por agua en tuberías	Técnico/Profesional
	Evaluar la carga diaria del biodigestor y la proporción líquido/sólido	Operario
	Mantener un control de ST ingresando al biodigestor, utilizar medidas para estandarizar cantidad de sólidos	Operario
4	Utilizar métodos internos y externos para disminuir cantidad de H ₂ S presentes en el biogás	Técnico/Profesional
	Rediseñar espacios en caso de que exista alto riesgo de exposición	Técnico/Profesional
	Colocar antorcha respetando parámetros de distancia y seguridad	Operario
6	Cambiar diseño de quemadores / Habilitar recurso de almacenamiento secundario	Técnico/Profesional
	Diferenciar las tuberías de sustratos y biogás con ayuda de pintura	Operario
9	Diferenciar las tuberías de sustratos y biogás con ayuda de pintura	Operario
	Elaborar un plan que integre medidas preventivas ante los posibles riesgos	Técnico/Profesional
10	Elaborar un plan que integre medidas preventivas ante los posibles riesgos	Técnico/Profesional
	Diseñar sistema de control de olores para evitar daños en el sistema y proliferación de plagas	Técnico/Profesional
	Cambiar filtro o método de filtrado para disminuir H ₂ S en biogás/mejorar condiciones microbianas del biodigestor	Técnico/Profesional
11	Contar con un plan de manejo para sustratos putrescibles	Técnico/Profesional
	Realizar plan de gestión para efluentes	Técnico/Profesional

Como parte de las oportunidades de mejora en la industria avícola se encuentran:

- Realizar e implementar un plan de mantenimiento preventivo y correctivo para equipos.
- Evitar existencia de árboles cerca del biodigestor y diseñar estructura de protección para el biodigestor desde el suelo para evitar daños físicos provocados por plagas.
- Utilizar materiales resistentes a condiciones climáticas y a reacciones químicas.
- Controlar diariamente los valores de pH e implementar métodos de regulación de pH.
- Manejar un portafolio con documentación importante de la planta.
- Realizar caracterización de entradas y salidas del biodigestor cada 6 meses.
- Dar seguimiento al plan de mantenimiento y cumplir las inspecciones periódicas.
- Mantener un control del vapor de agua presente en el biogás.
- Ubicar las tuberías conductoras de biogás y antorcha lejos de zonas de riesgo, como casas o calles.
- Realizar experimentos para determinar el método más eficiente que permita disminuir sólidos sin afectar el sistema.
- Reestructurar diseño de antorcha, colocar más antorchas para suplir la capacidad del biodigestor.
- Monitorear consumo de quemadores diariamente. Las válvulas de corte deben estar identificadas y ser de fácil acceso.
- Colocar la dirección de conducción y el nombre del tipo de material que se transporta / corroborar estado de la pintura periódicamente.
- Dar capacitación a los operarios, delegar una persona encargada para seguimiento.
- Utilizar membranas para cubrir los sustratos sólidos y controlar malos olores.
- Realizar mediciones diarias de H₂S, colocar filtro para H₂S y contar con un plan de mantenimiento para filtro.
- Diseñar sistema de tratamiento para sustratos putrescibles.

En general, las plantas necesitan de una mejor cultura de organización para poder corregir el proceso de generación de biogás. Es importante que se desarrolle el plan de gestión y mantenimiento para asegurar la integridad de los equipos. Esto también permite mantener a los equipos alineados.

Asimismo, es de verdadera importancia la gestión documental, ya que la documentación de procesos funciona para los miembros del equipo como una hoja de ruta que indica como, cuando y donde se deben tomar medidas de acción.

Es importante a su vez considerar la capacitación al personal, esto porque las operaciones dentro de las plantas se pueden desarrollar de una mejor forma, se tiene una mayor gestión de riesgos y seguridad, y los operarios tendrán la formación para actuar correctamente en situaciones adversas.

Por último, para establecer metas de mejora en el proceso, las plantas pueden utilizar el establecimiento de indicadores de desempeño, de esta manera se puede evaluar el crecimiento basado en metas alcanzables, que se basan en propuestas accesibles de los mismos operarios de la planta.

5 CONCLUSIONES

La herramienta guía para inspección propuesta permitió recopilar información importante para evaluar parámetros críticos que afectan el funcionamiento y rendimiento de las plantas de digestión anaerobia que no estaban disponibles previamente en el país. Al ofrecer una metodología replicable, esta herramienta puede adaptarse y utilizarse en diversas regiones y contextos, lo que favorece la sostenibilidad y eficiencia de la digestión anaerobia a nivel nacional. Su estructura basada en la revisión bibliográfica y en normativas vigentes garantiza una evaluación exhaustiva y precisa de las plantas.

La aplicación de la herramienta en cuatro plantas de digestión anaerobia, dos a escala industrial y dos a escala mediana, permitió identificar diversas falencias en todas las instalaciones evaluadas. Las deficiencias detectadas abarcaron distintas secciones de la herramienta, subrayando la necesidad de realizar mejoras significativas en varios aspectos operativos y técnicos. Estos hallazgos evidencian que las plantas de digestión anaerobia, independientemente de su escala, enfrentan desafíos comunes que deben ser abordados para mejorar su desempeño.

Los resultados obtenidos destacan la relevancia de realizar revisiones y diagnósticos continuos en las plantas de digestión anaerobia. La herramienta desarrollada puede servir como una guía periódica para asegurar que las plantas operen bajo condiciones óptimas y se obtengan todos los beneficios deseados de ellas. La implementación de revisiones regulares contribuirá a la identificación temprana de problemas y a la adopción de medidas correctivas oportunas, mejorando así la eficiencia y la sostenibilidad de las plantas.

La implementación de la metodología de Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE) en sistemas de digestión anaerobia a escala mediana e industrial resultó efectiva para identificar potenciales fallos, establecer prioridades y desarrollar acciones correctivas para mitigar su aparición. La aplicación de esta metodología permitió una evaluación detallada de los riesgos asociados con la operación de las plantas y la implementación de medidas preventivas para mejorar su desempeño.

Se identificó un vacío significativo en la documentación y registro de información importante en las plantas visitadas, lo que limita la capacidad para mejorar las condiciones de operación y funcionamiento de los biodigestores. La falta de registros detallados dificulta el análisis y la resolución de problemas, y subraya la necesidad de implementar sistemas de gestión de información más eficientes y completos.

Las plantas de digestión anaerobia en Costa Rica enfrentan desafíos significativos en términos de operatividad, seguridad y mantenimiento. Las principales causas de las fallas detectadas incluyen condiciones inadecuadas de diseño, falta de mantenimiento en equipos y componentes, operación incorrecta de equipos o procesos, y variaciones en la composición o carga del sustrato. Estos desafíos requieren la implementación de estrategias de gestión más efectivas y una mayor inversión en capacitación y mantenimiento para asegurar un funcionamiento óptimo de las plantas.

6 RECOMENDACIONES

- Se sugiere elaborar un plan de operación y mantenimiento para los operadores de las plantas, que incluya tasas de carga adecuadas del digestor y contenido de sólidos totales del afluente, procedimientos operativos adecuados para el digestor. Incluidos rangos de temperaturas y pH, cronograma de mantenimiento del digestor y otros componentes, estimaciones de producción de biogás, contenido de metano y potencial de recuperación de energía, instrucciones para el uso seguro y quema de biogás.
- Se sugiere desarrollar un plan de monitoreo para cada planta, entendiendo sus necesidades operativas, con la finalidad de mejorar el proceso productivo de biogás.
- Se propone realizar pruebas de otros parámetros que pueden ayudar a entender la situación de los biodigestores a nivel microbiológico, como la distribución y cantidad nutrientes en el sustrato y cuantificación de ácidos grasos.
- Se recomienda realizar experimentos con distintas cantidades de sólidos totales en las mezclas para determinar la relación óptima que permite los mejores rendimientos dentro de los biodigestores.
- Basado en los resultados de la BMP, se recomienda ajustar varios parámetros operacionales, incluyendo la temperatura, el pH y la carga orgánica, para maximizar el rendimiento de biometano. Estos ajustes no solo mejorarían la producción de biogás, sino que también contribuirían a una mayor estabilidad y eficiencia del proceso.

7 REFERENCIAS

- Abello, A. T. (Diciembre de 2018). *Universidad del Norte* . Obtenido de Análisis de los posibles factores que dificultan la implementación de biodigestores tipo tubular y cúpula flotantes en las zonas rurales y urbanas de la Región Norte de Colombia: <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/8529/135399.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Aguilera, E. R. (30 de Julio de 2019). *Repositorio Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua*. Obtenido de Generación de biogás, mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos, en la zona rural de Estelí, en el período 2016-2018 : <https://repositorio.unan.edu.ni/12306/1/5892.pdf>
- Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Kottner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., & Janssen, R. (2008). *Biogas. Handbook*. Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg.
- Allendes, J. C. (Marzo de 2016). *Repositorio Universidad de Chile*. Obtenido de Evaluación técnica y económica de una planta de biogás para autoabastecimiento energético: una estrategia para diferentes contextos: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/133520/Evaluacion-tecnica-y-economica-de-una-planta-de-biogas.pdf?sequence=1>
- American Public Health Association [APHA]. (1989). *Standard methods for the examination of water and wastewater. 17th edition*. Obtenido de <https://tamug-ir.tdl.org/handle/1969.3/24401>
- Aqualimpia Engineering e.K. (sf). *Aqualimpia*. Obtenido de Biodigestores Industriales-Digestores: <https://www.aqualimpia.com/>

- Araya, J. G. (2015). Experiencia de Biodigestores en Costa Rica. *Jornada sobre experiencias nacionales en biodigestión y gasificación*. REDICA.
- Arboleda, Y. O. (Julio de 2009). *Repositorio Universidad Nacional de Colombia*. Obtenido de Fundamentos para el diseño de biodigestores: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/10762/luisoctaviogonzalezsalcedo.20121.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Arias, F. J. (Agosto de 2018). *Repositorio TEC*. Obtenido de Impactos de la implementación de biodigestores en asentamientos rurales, caso El Porvenir de Limón: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10012/impactos_implementaci%C3%B3n_biodigestores_asentamientos_rurales.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Asociación Costarricense de Biogas [ASOBIOGÁS]. (2021). *ASOBIOGÁS*. Obtenido de https://asobiogas.org/la-asociacion
- Bernal, J., & Orozco, J. (2019). *Repositorio Institucional de la Universidad Pontificia Bolivariana*. Obtenido de Comparación del estiércol bufalino y bovino como potenciales inóculos en el proceso de digestión anaerobia: https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/8441
- Bestratén, M., Orriols, R., & Mata, C. (2004). *Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo*. Obtenido de NTP 679: Análisis modal de fallos y efectos. AMFE: https://www.insst.es/documents/94886/326775/ntp_679.pdf/3f2a81e3-531c-4daa-bfc2-2abd3aaba4ba

- Blanco, D. (2009). *Dialnet*. Obtenido de Tratamiento biológico aerobio-anaerobio-aerobio de residuos ganaderos para la obtención de biogás y compost:
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=26994>
- Blanco, V., & Peña, N. (2019). *Repositorio Universidad Pontificia Bolivariana*. Obtenido de Evaluación de la capacidad de producción de metano a partir de la co-digestión anaerobia de desechos alimenticios cocidos generados en cafeterías de instituciones universitarias:
<https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/9004>
- Botero, R., & Obando, G. (12 de Octubre de 2022). *Engormix*. Obtenido de Difusión, utilización y captación de Co2 equivalente por los biodigestores de bajo costo en Costa Rica:
<https://www.engormix.com/ganaderia-carne/articulos/difusion-utilizacion-captacion-co2-t51258.htm>
- Botero, R., & Preston, T. (1987). *Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su operación y utilización*. Sin publicación.
- Campos, A. (2001). *Tesis Doctorales en Xarxa*. Obtenido de Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria:
[chrome-extension://efaidnbmnnnibpajpcgiclfndmkaj/https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8229/Tecp1de1.pdf](https://efaidnbmnnnibpajpcgiclfndmkaj/https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8229/Tecp1de1.pdf)
- Cano, Y., Rodríguez, R., Soberats, J., & Velázquez, R. (2019). Gestión del funcionamiento de plantas debiogás en la remoción de contaminantes biogás en la remoción de contaminantes. *Ciencias Técnicas*, 58-68.

- Carhuancho, F., Ramírez, J., & Guerrero, J. (2014). Gestión ambiental de residuos avícolas mediante digestión anaerobia para la producción de fertilizantes orgánicos líquidos. *Anales Científicos*, 125-132.
- Carrasco, E. C., & Echeverría, D. E. (2018). *Repositorio USM*. Obtenido de Proyecto de un biodigestor para vivienda rural: <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/45995/3560901543866UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Castillo, S., & Michalus, J. (2023). Aplicación de la herramienta de análisis del modo de fallas y efectos en cadenas de suministro agroindustriales de pequeña escala. *Visión de futuro*, 199-223.
- Castro, L., Hernández, H., Gómez, O., & Jiménez, D. (2016). Analysis of methanogenic and energetic potential from slaughterhouse wastewater using anaerobic digestion. *DYNA*, 41-49.
- Cerutti, F., Córdoba, V., & Santalla, E. (2016). Evaluación de la producción de biogás de biomazas no convencionales. *The Fifth International Symposium on Environmental Biotechnology and Engineering*.
- Chynoweth, D., Turick, C., Owens, J., Jerger, D., & Peck, M. (1993). Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 95-111.
- Colmenares, W., & Santos, K. (2007). *Generación y manejo de gases en sitios de disposición final*. Obtenido de <https://docplayer.es/350531-Generacion-y-manejo-de-gases-en-sitios-de-disposicion-final.html>

- Consultoría e Inversiones CABAL S.A. (2014). *Guía de Buenas Prácticas. Proyectos de Biodigestores*. Managua: CABAL S.A.
- Cubero, G. (2011). *Repositorio TEC*. Obtenido de Evaluación de un sistema de digestión anaerobia para la estabilización de los lodos provenientes de las aguas residuales, Corporación PIPASA, San Rafael de Alajuela: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/2622>
- Custodio, L., & Santos, J. (2020). *Repositorio Institucional UPN*. Obtenido de Biogás a partir de la biodigestión de lodos del tratamiento de aguas residuales con estiércol de ganado vacuno de la ciudad de Trujillo: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/24035>
- Durán, D. (2020). *Repositorio Universidad Nacional de Colombia*. Obtenido de Aprovechamiento energético de la codigestión anaeróbica de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y residuos de cosecha de plátano para la producción de biogás: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79232>
- Echeverría, D., & Chamorro, E. (2018). *Repositorio Universidad Técnica Federico Santa María*. Obtenido de Proyecto de un Biodigestor para vivienda rural: <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/45995>
- Enríquez, A., & Jurado, M. (2016). Análisis del arranque y estabilización de un biodigestor anaerobio Taiwán en condiciones psicrófilas en el SENA (Nariño-Colombia). *Revista UNIMAR*, 243-259.
- Favior, L., & Kirk, D. (2011). *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Obtenido de Statistical Verification of a Biochemical Methane Potential Test : <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=37363>

- Favior, L., & Kirk, D. (2011). *Statistical Verification of a Biochemical Methane Potential Test*. Louisville: American Society of Agricultural and Biological Engineers. Obtenido de Statistical Verification of a Biochemical Methane Potential Test. American Society of Agricultural and Biological Engineers,: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=37363>
- Flores, D. (2014). *Repositorio TEC*. Obtenido de Potencial metanogénico de residuos lignocelulósicos específicos disponibles en las fincas agrícolas costarricenses para cogeneración: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpajpcglclefindmkaj/https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3297/potencial_metanogenico_residuos_lignocelulosicos_especificos.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3297/potencial_metanogenico_residuos_lignocelulosicos_especificos.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Giron, J. (2023). *Repositorio Universidad Nacional Agraria de la Selva*. Obtenido de Efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la actividad metanogénica específica en la empresa servicios agrarios de Pucallpa SAC. - Perú, 2023: <https://repositorio.unas.edu.pe/handle/20.500.14292/2564>
- Gobierno de Costa Rica. (2019). *Dirección de Cambio Climático*. Obtenido de Plan de Descarbonización. Gobierno de Costa Rica 2018-2050: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpajpcglclefindmkaj/https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/02/PLAN.pdf](https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/02/PLAN.pdf)
- Godínez, I. J. (2014). *SIBDI UCR*. Obtenido de Validación de dos métodos cromatográficos: para determinar la composición de biogás y la concentración de ácidos grasos volátiles generados en un biogestor anaerobio a diferentes de temperaturas y composiciones de sustrato: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/2890>

Granados , J., Abril, D., & Mogollón, A. (2022). Cinética de la digestión anaeróbica de excretas porcinas para la obtención de biogás en laboratorio. *Redalyc*, 1-12.

Guillén, R. (2010). *Repositorio Tec*. Obtenido de Caracterización de los Parámetros de Operación de los Biodigestores a Escala del Instituto Tecnológico de Costa Rica: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/693/Informe_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Gutiérrez, P., & Rodríguez, C. (2018). *Repositorio Universidad de América*. Obtenido de Propuesta de mejora del proceso de producción de biogás en Jerusalén Cundinamarca: <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6716>

Herrero, F. (Mayo de 2017). *Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP)*. Obtenido de Energía Renovable en Costa Rica. Los retos de hoy: https://www.ariae.org/sites/default/files/2017-05/energia_renovable_en_costa_rica.pdf

Hilbert, J. (2019). *INTA*. Obtenido de Manual para la producción de biogás: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_para_la_produccion_de_biogas_del_iir.pdf

Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica [INTECO]. (2019). *INTECO*. Obtenido de Términos, definiciones y esquema de clasificación para la producción, acondicionamiento, mejoramiento y utilización de biogás: <https://www.inteco.org/shop/inte-iso-20675-2019-terminos-definiciones-y-esquema-de-clasificacion-para-la-produccion-acondicionamiento-mejoramiento-y-utilizacion-de-biogas-4231#attr=>

Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica [INTECO]. (2020). *INTECO*. Obtenido de INTE E56:2020 Requisitos mínimos para las plantas de biogás de escala mediana y grande y sus

componentes asociados: <https://www.inteco.org/shop/inte-e56-2020-requisitos-minimos-para-las-plantas-de-biogas-de-escala-mediana-y-grande-y-sus-componentes-asociados-8175?search=INTE+E56%3A2020+#attr=>

Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica [INTECO]. (2020). *INTECO*. Obtenido de Antorchas para la combustión del biogás.: https://www.inteco.org/en_US/shop/inte-iso-22580-2020-antorchas-para-la-combustion-del-biogas-8413#attr=

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA]. (2023). *Repositorio IICA*. Obtenido de Estado actual de la biodigestión en América Latina y el Caribe.: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/21579>

Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica [INEC]. (23 de Marzo de 2021). *INEC Costa Rica*. Obtenido de Objetivos de Desarrollo Sostenible: <https://www.inec.cr/objetivos-de-desarrollo-sostenible>

Jiménez, D. (2012). *Repositorio Institucional de la Universidad Veracruzana*. Obtenido de Evaluación de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo continuo: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/31560/1/delamercedjimenezdiego.pdf

Jiménez, F. (2018). *Repositorio TEC*. Obtenido de Impactos de la implementación de biodigestores en asentamientos rurales, caso El Porvenir de Limón: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10012/impactos_implementaci%C3%B3n_biodigestores_asentamientos_rurales.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- López, H., Barrón, A., Franco, M., Paz, A., & Pérez, A. (2021). Modelación de la generación de metano a partir de suero lácteo y excreta de ganado en codigestión anaerobia. *Nova Scientia. Revista de Investigación de la Universidad De La Salle Bajío*, 1-17.
- Lugo, H., Torres, A., & Lugo, R. (2012). Riesgos y problemas de operación en una planta de producción de biogás. *Reserchgate*, 1841-1846.
- Martí, J. (2020). *Info agronomo*. Obtenido de Biodigestores de bajo costo, produce biogas y fertilizante natural: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Biodigestores-de-bajo-costo.pdf
- Ministerio de Salud. (2016). *Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos*. San José: Ministerio de Salud .
- Moguel, J. (2018). *Universidad Veracruzana*. Obtenido de Modelado y simulación de procesos de digestión anaerobia de desechos agroindustriales: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.uv.mx/veracruz/miaplicada/files/2021/07/Tesis_Jazael-Guadalupe-Moguel-Castaneda.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2019). *Guía Teórico-Práctica sobre el Biogás y los Biodigestores*. Buenos Aires: FAO.
- Ortiz, C., & Carvajal, J. (2023). *Repositorio Universidad Autónoma de Bucaramanga*. Obtenido de Implementación de un montaje de referencia para la evaluación del potencial bioquímico de metano en la degradación de contaminantes provenientes de la agroindustria colombiana: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repository.unab.edu.co/bitstream/h

andle/20.500.12749/20053/2023_Tesis_Camilo_Andres_Ortiz.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Palomo, C. (2017). *RID-UNRN*. Obtenido de Estudio de factibilidad de instalación de una planta de biogás en el establecimiento avícola “Ponedoras del Neuquén: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://rid.unrn.edu.ar/bitstream/20.500.12049/644/1/Palomo-.pdf

Parra, O., & Alexis, B. (2014). *Biblioteca Digital Univalle*. Obtenido de Producción de metano a partir de la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/bb606cbc-1039-4d73-8778-bbbf4b234e52/content

Pecar, D., & Gorseck, A. (2020). Kinetics of methane production during anaerobic digestion of chicken manure with sawdust and miscanthus. *ScienceDirect. Biomass and Bioenergy*, 1-7.

Programa de Servicios Agrícolas Provinciales [PROSAP]. (27 de Noviembre de 2009). *CIAP*. Obtenido de Centro de Información de Actividades Porcinas.

Ramírez, D. (2021). *Red de repositorios latinoamericanos*. Obtenido de Herramientas y técnicas de mejora de la calidad en la industria de alimentos latinoamericana y su aporte a la competitividad organizacional: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3610174>

Ramón, A., Vásquez, J., Delgado, J., Domínguez, D., Mosquera, A., Molina, F., & Peñuela, M. (2023). Evaluation of Potential Substrates for Biogas Production in Colombia using Anaerobic Digestion Systems. *Ingeniería e Investigación*, 1-11.

- Red de Biodigestores para Latinoamérica y el Caribe [RedBioLAC]. (2016). *Energypedia*.
Obtenido de Oportunidades para el desarrollo de un sector sostenible de biodigestores de
pequeña y mediana escala en LAC: chrome-
extension://efaidnbmnnnibpajpcglclefindmkaj/https://energypedia.info/images/4/49/Opo-
rtunidades-desarrollo-sector-_seg%C3%BAAn-RedBioLAC.pdf
- Reyes, E. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del
aprovechamiento de sustratos orgánicos. *Revista Científica de FAREM-Esteli*, 60-81.
- Rivas, O. S., Vargas, M. F., & Watson, R. G. (2010). Biodigestores: factores químicos, físicos y
biológicos relacionados con su productividad. *Tecnología en Marcha*, 39-46.
- Romero, G. M. (2020). *Biodigestores. Manual Práctico de Diseño. Dimensionamiento, Diseño y
Construcción de Biodigestores y Plantas de Biogás*. Alemania: AquaLimpia Engineering
e.K.
- Salazar, S. D., & Cortes, H. T. (2019). *Repositorio Universidad Católica de Colombia*. Obtenido
de Análisis de viabilidad de la implementación de biodigestores como alternativa
energética para familias del área rural:
https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/24238/1/TRABAJO%20DE%20S%C
3%8DNTESIS%20BIODIGESTORES..pdf
- Sánchez, M. (Dirección). (2024). *Explosión en reservorio de planta de biogás* [Película].
- SARPA-FIRCO. (2009). *Unidad de Ecotecnologías*. Obtenido de Diagnóstico General de la
Situación Actual de los Sistemas de los Sistemas de Biodigestión en México: chrome-
extension://efaidnbmnnnibpajpcglclefindmkaj/https://ecotec.unam.mx/wp-
content/uploads/Diagnostico-Nacional-de-los-Sistemas-de-Biodigestion.pdf

- Schröer, R., & Remler, S. (2018). *Guía para el instalador de plantas de biogás de mediana y gran escala*. Santiago: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.
- Solano, N. (2020). *Repositorio SIBDI*. Obtenido de Diseño de un sistema compacto para el tratamiento de residuos urbanos: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/16185/45277.pdf?sequence=1
- Solarte, J., Mariscal, J., & Aristizábal, B. (2017). Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio. *Redalyc*, 105-116.
- Solutions, C. E. (2017). *Condorchem Enviro Solutions*. Obtenido de Tratamiento del biogás: <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-del-biogas/>
- Suárez, K. (2022). Avances y desafíos en la promoción y gestión público-institucional de los residuos agropecuarios en Costa Rica. *Revista de Política Económica y Desarrollo Sostenible*, 1-19.
- Tamayo, P. G., & Torres, C. R. (2018). *Repositorio Universidad de América*. Obtenido de Propuesta de mejora del proceso de producción de biogás en Jerusalén (Cundinamarca): <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6716/1/6122893-2018-1-IQ.pdf>
- Usack, J., Wiratni, W., & Angenent, L. (2014). Improved Design of Anaerobic Digesters for Household Biogas Production in Indonesia: One Cow, One Digester, and One Hour of Cooking per Day. *The Scientific Journal*, 1-8.

- Valenti, F., Porto, S., Selvaggi, R., & Percorino, B. (2018). Evaluation of biomethane potential from by-products and agricultural residues co-digestion in southern Italy. *Journal of Environmental Management*, 834-840.
- Velazquez, C. A. (Septiembre de 2016). *Uso de Biodigestores en la Industria Pecuaria*. Obtenido de Universidad Autónoma del Estado de México: <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/66337/TESINA-CAV-1016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vergara, M. V. (Julio de 2017). Los manuales de procedimientos como herramientas de control interno de una organización. *Universidad y Sociedad*, 247-252. Obtenido de Los Manuales de Procedimiento como Herramientas de Control Interno de una Organización: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202017000300038
- Villareal, C., Guerrero, J., Acosta, E., Víquez, J., Villalobos, H., Carazo, L., . . . Hernández, C. (2021). *Mantenimiento y operación de biodigestores agropecuarios: Guía práctica para el pequeño productor*. San José: Taller de Publicaciones Tecnológico de Costa Rica.
- Víquez, J. (Julio de 2017). *Asobiogás*. Obtenido de Determinación del potencial de biogás a nivel nacional: <http://nebula.wsimg.com/5705bf3f968f521d443a5a08d81f1ab3?AccessKeyId=11F7CE3E4517D29E4C81&disposition=0&alloworigin=1>
- Wang, C., Zhang, Y., Zhang, L., & Pang, M. (2016). Alternative policies to subsidize rural household biogas digesters. *ScienceDirect Energy Policy*, 187-195.
- Watson, R. G. (Enero de 2010). *Repositorio Instituto Tecnológico de Costa Rica*. Obtenido de Caracterización de los Parámetros de Operación de los Biodigestores a Escala del Instituto

[https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/693/Informe_Final.pdf?sequence=1
&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/693/Informe_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Xu, C., Song, L., Li, X., Cheng, J., & Li, Y. (2017). Effects of Hydrogen Sulfide on Biomass Boilers and its Control Measures. *ScienceDirect*, 1585-1590.

Zwietering, M., Jongenburger, I., Rombouts, F., & Riet, K. (1990). Modeling of the Bacterial Growth Curve. *Applied and Environmental Microbiology*, 1875-1881.

8 ANEXOS

ANEXO A: Criterios evaluados en la Guía de Inspección.

Tabla A1. Criterios evaluados en la sección uno de la herramienta.

Sección	Subsección	Criterio
Información general	Identificación de Biodigestor	- Fecha en que se realiza la inspección
		-Persona encargada
		-Nombre de la planta
		-Ubicación Geográfica
		-Tipo de Biodigestor
		-Uso del Biodigestor
		-Capacidad de generación energética (MWh/año)
		-Clasificación
		-Tipo de materia prima
		-Modelo de negocio
		-Estatus de la planta (Operación actual)
		-Valor promedio de generación de Biogás (m ³ /día)
		-Fases del proceso
		-Destino de la energía/Usos del Biogás
		-Años de funcionamiento
		-Frecuencia de alimentación
Generalidades del Biodigestor		-Método de recolección de la materia prima
		-El digestor es hermético, con protección a la luz ultravioleta y con una estructura adecuada
		-Los aislantes térmicos cuentan con protección a daños externos físicos y químicos
		-Se utilizan materiales de protección resistentes a condiciones climáticas y reacciones químicas
		-Tanques metálicos son colocados sobre una base de concreto
		-Componentes en contacto con el biogás son resistentes o tienen protección especial como resinas, epoxi o membranas especiales
		-Se realiza revisiones periódicas para la detección de fugas

Tabla A2. Criterios evaluados en la sección dos de la herramienta.

Sección	Subsección	Criterio
Instalaciones físicas	Datos operacionales	<ul style="list-style-type: none"> -Porcentaje de metano en Biogás -Distancia entre el biodigestor y el punto de alimentación -Número de reactores -Capacidad del biodigestor -Posee Sistema de calefacción -Posee Sistema de mezclado -Tiempo de Retención Hidráulico -Temperatura de operación -Tipo de llenado -Posee filtro para H₂S -Se realizan mediciones periódicas del contenido de metano -Separación de reactores correcta -Cuenta con plano de las instalaciones -Cuenta con un mapeo o flujo del proceso -Cuenta con sistema de descarga de sedimentos -Se realiza extracción de lodos -Se registran los procesos de extracción
	Caracterización de instalaciones y control de proceso	<ul style="list-style-type: none"> -Cuenta con plan de mantenimiento y calibración de equipos -Cuenta con un manual de operación, control y mantenimiento que detalla todos los procesos de la planta, vida útil de los equipos y dosis y frecuencia de uso de reactivos -Se realizan inspecciones documentales e inspecciones visuales y de pruebas funcionales -Se realizan inspecciones periódicas para seguridad estructural, sistemas presurizados, instalaciones eléctricas, control de la contaminación y seguridad funcional -Se documentan las inspecciones y resultados en una bitácora -Se realiza la eliminación de vapor de agua del biogás -Posee los manuales de funcionamiento e instrucciones de los fabricantes de los equipos de la instalación -Cuenta con sistema de detección que realice un cierre automático con válvulas de corte

Tabla A3. Criterios evaluados en la sección tres de la herramienta.

Sección	Subsección	Criterio
Caracterización de afluente y efluente	Análisis organoléptico	-Color
		-Olor
		-Turbidez
		-Estado de la muestra
		-DQO
		-pH
		-Sólidos Totales
Parámetros de Gompertz	Análisis fisico-químico	-Sólidos Volátiles
		-a
		-b
		-c
		-Porcentaje de CH ₄
Composición del biogás		-Porcentaje CO ₂
		-Porcentaje O ₂
		-Porcentaje CO
		-Porcentaje H ₂ S

Tabla A4. Criterios evaluados en la sección cuatro de la herramienta.

Sección	Subsección	Criterio
Sistema de quema de excedente de biogás	General	<ul style="list-style-type: none"> - Cuenta con antorcha - Tipo de antorcha -Cuenta con dispositivo de control automático de llama -Se encuentra ubicada con sus aperturas sobre el nivel del suelo -Posee una distancia con edificios, calles, caminos, carreteras o almacenamiento de materiales inflamables correcta -La antorcha tiene una altura de salida de llama de al menos 4 m -Antorcha posee una estabilidad correcta -Cuenta con un corta flamas entre la válvula principal de gas y el quemador -Los materiales de la estructura tienen al menos 10 años de vida útil -Antorcha dispone un sistema de corte de suministro accionado manualmente, un sistema de corte de llama y de un mecanismo de encendido automático -Los quemadores tienen una capacidad del doble a la producción máxima de biogás de diseño de la instalación -Se enciende cuando se produce una detención de los equipos de consumo por mantenimiento, cada vez que la producción de gas supere el consumo, cuando está en su máxima capacidad de almacenamiento -Cuenta con quemador de ignición o un quemador piloto -Cuenta con una válvula de cierre de seguridad
		<ul style="list-style-type: none"> -Posee un sistema de control para válvulas y quemador. (Encendido y apagado) -Posee un dispositivo de drenaje para el agua condensada -La antorcha no se encuentra colocada en el punto más bajo de los alrededores -Cuando la antorcha se detiene debido a fallas la válvula de suministro se mantiene cerrada -Se realiza como mínimo una inspección completa anual del sistema
Sistema de quema de excedente de biogás	General	

Tabla A5. Criterios evaluados en la sección cinco de la herramienta.

Sección	Subsección	Criterio
Sistema de calefacción y sistema de mezclado	General	<ul style="list-style-type: none">-Ambos sistemas cuentan con medidas de seguridad para su operación-El sistema de calefacción posee sensores de temperatura y controles térmicos-En el sistema de calefacción se utilizan materiales compatibles que sean anticorrosivos y resistentes a cambios climáticos-Tipo de mezclado que se utiliza-Se realizan revisiones periódicas de la corrosión que puede ocasionar el sulfuro de hidrógeno en el equipo de mezclado-Se tiene acceso con el sistema de mezclado para brindar mantenimiento al biodigestor-Los motores del sistema de mezclado son a prueba de explosión-El sistema de mezclado cuenta con un control de generación de espuma

Tabla A6. Criterios evaluados en la sección seis de la herramienta.

Sección	Subsección	Criterio
Sistema de tuberías y accesorios	General	<ul style="list-style-type: none"> -Cuenta con resistencias a las presiones de operación -Cuenta con protección contra sobrepresión y subpresión -Toda la tubería de conducción de biogás se encuentra por encima del suelo para evitar problemas de mantenimiento bajo espacios subterráneos -Las tuberías no pasan por zonas de uso común, dormitorios o baños -Las tuberías no pasan por puntos de ignición en todo su recorrido o por cuartos que guarden sustancias inflamables -Las tuberías se diferencian por colores según el material que transportan -Las tuberías a la vista se identifican de color amarillo, con la palabra BIOGÁS en negro y una flecha que indica la dirección del flujo -Las tuberías horizontales poseen una pendiente del 1% hacia los filtros o trampas de condensados para evitar obstrucciones -Se puede garantizar la integridad de la tubería a lo largo de todo su recorrido
Sistema de tuberías y accesorios	General	<ul style="list-style-type: none"> -Las válvulas son de material resistente a la corrosión -Se utilizan tuberías de cobre, bronce, aluminio y acero al carbono para la conducción de biogás -Equipos y tuberías tienen protección UV -Si la tubería es aérea las grapas metálicas que la soportan tiene un material aislante -La tubería enterrada tiene una cama de 5 cm y una cubierta de 5 cm de arena sin piedras o materiales con bordes cortantes -Las instalaciones cuentan con una válvula de corte rápido que interrumpa el suministro de biogás -Las tuberías de conducción de gas tienen drenajes de condensado en caso de que baje la presión del Biogás para evitar obstrucciones -La presión máxima de las tuberías es de 6 kPa -La presión máxima es de 400 kPa si posee diámetros que superan las 6 in -Las tuberías que tengan que pasar por áreas comunes como comedores u oficinas no superan presiones de 5 kPa -Las tuberías están fijadas a superficies con alta resistencia mecánica -Se realizan pruebas de hermeticidad de las tuberías periódicamente

Tabla A7. Criterios evaluados en la sección siete de la herramienta.

Sección	Subsección	Criterio
Sistema de filtrado y sistema de regulación de presión	General	<ul style="list-style-type: none">-Sistema de filtrado posee un proceso de limpieza para la reducción de humedad y contenido de sulfuro de hidrógeno-El filtro se cambia periódicamente y se lleva un registro de sus cambios-El filtro es funcional y disminuye significativamente el H₂S-Los compresores se ubican agua abajo de la limpieza del biogás-Los compresores se ubican en un cuarto denominado solo para estos efectos

Tabla A8. Criterios evaluados en la sección ocho de la herramienta.

Sección	Subsección	Criterio
Sistemas de almacenamiento	Almacenamiento de Biogás	<ul style="list-style-type: none"> -El lugar de almacenamiento de biogás es a prueba de fugas de gas -Se realiza una inspección periódica para detección de fugas de biogás -Cuenta con válvulas de alivio en los tanques de almacenamiento -Cuenta con material a prueba de presión y resistentes al medio, luz ultravioleta y temperatura -Se tiene una distinción en la presión de los tanques (baja (0.5-0 mbar), media- alta (5-50 mbar)) -Los medios de almacenamiento cuentan con una separación correcta entre ellos y con otros elementos -Cuenta con estructura de protección -Se almacena en una estructura impermeabilizada
	Almacenamiento del digestado	<ul style="list-style-type: none"> -Cuenta con un sistema de purga y control de olores -Cerca de las zonas de almacenamiento se cuenta con un sistema de control para plagas -Posee una cubierta a prueba de fugas de gas para aprovechar el gas residual del digestado -La fracción sólida se almacena al aire libre sobre una superficie impermeabilizada o dentro de contenedores

Tabla A9. Criterios evaluados en la sección nueve de la herramienta.

Sección	Subsección	Criterio
Gestión de seguridad y riesgos	General	-Cuenta con plano de identificación de peligros -Cuenta con plan de protección contra explosiones e incendios -Cuenta con registro de sustancias peligrosas y fichas de datos de seguridad
	Riesgo para el medio ambiente	-Cuenta con señalización de prevención y seguridad -Las instalaciones cuentan con alguno/os de los siguientes peligros -Existe fuga de Biogás al ambiente -Vertido de líquidos o sólidos del proceso al suelo o cuerpos de agua por fugas o derrames
	Riesgo para la salud humana	-Riesgo de asfixia o intoxicación -Exposición a gases tóxicos de reacciones entre sustratos -Irritación de vías respiratorias y ojos
	Riesgo para la salud humana	-Riesgo asociado a uso de aditivos o reactivos con propiedades peligrosas -Peligro relacionado al cambio de filtros de depuración de biogás -Presencia de bacterias, virus, hongos, parásitos, vectores que puedan ingresar por vía cutánea-mucosa
	Peligros eléctricos	-Existe peligro por descarga eléctrica -Existe peligro por campos eléctricos o magnéticos -Existe peligro por descarga eléctrica por electricidad estática
	Peligros mecánicos	-Existe ruido y vibraciones -Existe peligro de caídas, equipo expuesto, cortes, golpes -Existe riesgo de incendio o explosión
	Peligros por comportamiento inadecuado	-Falta de conocimiento o falta de experiencia -Poca habilidad para labores de operación y mantenimiento -Negligencia operacional -Posee señalización para uso de equipos, protección personal y áreas riesgo
	Requisitos de seguridad	-Cuenta con tuberías identificadas con código de colores -Existe identificación de tuberías, señalización y demarcaciones visibles -Posee requisitos de seguridad en instalación eléctrica y protección contra rayos

Tabla A9. Criterios evaluados en la sección nueve de la herramienta. Continuación.

Sección	Subsección	Criterio
Gestión de seguridad y riesgos	Requisitos de seguridad	<ul style="list-style-type: none">-Posee sistema para evitar ingreso de aguas externas-Cuenta con antorcha de quema activa-Sustancias químicas utilizadas cumplen con la legislación nacional vigente-Cuenta con detectores de gases fijos o portátiles o el sistema se encuentra en un área abierta-Cuenta con ventilación adecuada-Se hace uso de equipo de protección en zonas potencialmente peligrosas-Sistema de detección de gases cuenta con plan de calibración-Cuenta con dispositivo que evite retroceso de la llama al biodigestor y reservorios del biodigestor-Cuenta con Plan de Bioseguridad debido a la exposición a riesgo biológico (limpieza de equipos, higiene personal y cambio de ropa)-Cuenta con plano donde se clasifican zona con atmósfera explosiva-Cuenta con equipos e instalaciones a prueba de explosiones-Cuenta con herramientas o equipos adecuados para tareas en zonas peligrosas-Cuenta con distancia de seguridad entre equipos

Tabla A10. Criterios evaluados en la sección diez de la herramienta.

Sección	Subsección	Criterio
Manejo de sustrato	Almacenamiento del sustrato	<ul style="list-style-type: none"> -Líquidos que se almacenan por más de 7 días se encuentran en espacios cerrados o cubiertos -Sustrato sólido se almacena cubierto con membranas para evitar plagas y control de olores -Se controla y monitorea la concentración de sulfuro de hidrógeno -Cuenta con sistema de tratamiento para sustrato putrescibles que generan malos olores -Se da un retorno de biogás a través del sistema de alimentación de sustrato -Los sustratos higiénicamente problemáticos son higienizados, se evitan sustancias inhibidoras
	Pretratamiento del sustrato	<ul style="list-style-type: none"> -La materia prima recibe algún tipo de pretratamiento -Se realizan mezclas de sustratos con características fisicoquímicas compatibles con la biodigestión -Se agregan aditivos al sustrato solo en caso de que no se generen concentraciones altas de gases, sustancias peligrosas o cambios bruscos de temperatura
	Transporte y alimentación	<ul style="list-style-type: none"> -Materiales de alimentación y transporte son resistentes al deterioro por corrosión -Cuenta con el método adecuado de transporte y alimentación según el tipo de sustrato -No existen fugas o rebalses -Las tuberías y canales se encuentran en buen estado -Las bombas se encuentran con suficiente espacio libre alrededor

Tabla A11. Criterios evaluados en la sección diez de la herramienta.

Sección	Subsección	Criterio
Pos-tratamiento	Digestado	<ul style="list-style-type: none"> -Cuenta con válvulas de cierre para aislar las bombas del sistema de tuberías -Se realiza postratamiento cuando los parámetros de vertido o reutilización del efluente no cumplen con la legislación vigente -Tipo de conversión del digestato -Cantidad de H₂S presente en el biogás (ppm)
	Biogás	<ul style="list-style-type: none"> -Se realiza postratamiento en el gas para disminuir H₂S -Se realiza postratamiento en el gas para disminuir CO₂ -Tipo de postratamiento para H₂S -Tipo de postratamiento para CO₂ Tipo de postratamiento para eliminación de vapor de agua

ANEXO B: Datos de plantas estudiadas

Tabla B1. Caracterización por visita para muestras frescas en plantas estudiadas.

Planta	Visita	Muestra	ST (mg/L)	SV (mg/L)
Industria cárnica	1		18 870	14 690
	2	Entrada	61 600	53 133
	3		54 187	47 537
	1		38 197	32 600
	2	Salida	25 033	20 730
	3		23 377	17 560
Industria palma aceitera	1		22 063	17 733
	2	Entrada	16 990	13 177
	3		20 780	16 877
	1		10 077	5 750
	2	Salida	9 720	5 083
	3		9 077	4 810
Industria vacuna	1		1 147	677
	2	Entrada	2 000	1 400
	3		1 253	697
	1		1 852	1 237
	2	Salida	2 843	1 763
	3		2 847	1 737
Industria avícola	1		12 757	4 593
	2	Entrada	123 137	86 413
	3		25 620	16 893
	1		31 353	19 380
	2	Salida	15 060	7 013
	3		18 203	8 280

Tabla B2. Caracterización por visita para PBM en planta de industria vacuna.

Repetición	Muestra	ST		SV	
		Inicial (mg/L)	Final (mg/L)	Inicial (mg/L)	Final (mg/L)
1	Entrada (1)	2280.00	1983.33	1790.00	1543.33
	Entrada (2)	2963.33	2726.67	2100.00	1946.67
	Entrada (3)	4396.67	3196.67	3060.00	2120.00
	Salida (1)	3113.33	2490.00	2280.00	1920.00
	Salida (2)	2693.33	2270.00	1940.00	1543.33
	Salida (3)	3376.67	2526.67	2650.00	1776.67
2	Entrada (1)	873.33	686.67	613.33	380.00
	Entrada (2)	1220.00	956.67	976.67	526.67
	Entrada (3)	1270.00	1253.33	916.67	690.00
	Salida (1)	523.33	420.00	483.33	320.00
	Salida (2)	473.33	403.33	390.00	313.33
	Salida (3)	826.67	713.33	666.67	436.67
3	Entrada (1)	953.33	826.67	613.33	516.67
	Entrada (2)	942.00	853.33	518.67	470.00
	Entrada (3)	923.33	853.33	486.67	443.33
	Salida (1)	693.33	560.00	503.33	400.00
	Salida (2)	673.33	596.67	480.00	420.00
	Salida (3)	643.33	583.33	420.00	356.67

Tabla B3. Caracterización por visita para PBM en planta de industria avícola.

Repetición	Muestra	ST		SV	
		Inicial (mg/L)	Final (mg/L)	Inicial (mg/L)	Final (mg/L)
1	Entrada (1)	15116.67	11313.33	8913.33	5508.72
	Entrada (2)	16250.00	9956.67	9903.33	4376.67
	Entrada (3)	14086.67	10843.33	8170.00	5053.33
	Salida (1)	2776.67	2743.33	1420.00	1373.33
	Salida (2)	2630.00	2586.67	1310.00	1116.67
	Salida (3)	2820.00	2613.33	1246.67	1183.33
2	Entrada (1)	5086.67	4190.00	2883.33	2003.33
	Entrada (2)	5016.67	4083.33	2780.00	1786.67
	Entrada (3)	5116.67	4016.67	2983.33	1733.33
	Salida (1)	4030.00	3643.33	2123.33	1593.33
	Salida (2)	3990.00	3643.33	2396.67	1603.33
	Salida (3)	4040.00	3623.33	2260.00	1666.67
3	Entrada (1)	5106.67	3960.00	2546.67	1703.33
	Entrada (2)	5006.67	3916.67	2590.00	1910.00
	Entrada (3)	4953.33	4293.33	2386.67	1983.33
	Salida (1)	3760.00	3410.00	1773.33	1600.00
	Salida (2)	3740.00	3373.33	1776.67	1540.00
	Salida (3)	3716.67	3586.67	1746.67	1683.33

Tabla B4. Caracterización por visita para PBM en planta de industria palma aceitera.

Repetición	Muestra	ST		SV	
		Inicial (mg/L)	Final (mg/L)	Inicial (mg/L)	Final (mg/L)
1	Entrada (1)	2770.00	2170.00	1793.33	1373.33
	Entrada (2)	2703.33	2430.00	1870.00	1463.33
	Entrada (3)	2980.00	2430.00	2113.33	1333.33
	Salida (1)	1983.33	1966.67	1126.67	1060.00
	Salida (2)	1873.33	1830.00	1100.00	1053.33
	Salida (3)	1980.00	1933.33	1190.00	1090.00
2	Entrada (1)	3036.67	2116.67	1916.67	1223.33
	Entrada (2)	3006.67	2176.67	1950.00	1246.67
	Entrada (3)	2830.00	2116.67	1786.67	1236.67
	Salida (1)	2313.33	1796.67	1393.33	1126.67
	Salida (2)	2310.00	1956.67	1423.33	1170.00
	Salida (3)	2230.00	1846.67	1380.00	1086.67
3	Entrada (1)	2736.67	1990.00	1913.33	1110.00
	Entrada (2)	2653.33	1946.67	1770.00	1146.67
	Entrada (3)	2586.67	2010.00	1736.67	1126.67
	Salida (1)	1916.67	1720.00	1113.33	1050.00
	Salida (2)	1966.67	1650.00	1193.33	1063.33
	Salida (3)	1950.00	1546.67	1180.00	1030.00

Tabla B5. Caracterización por visita para PBM en planta de industria cárnica.

Repetición	Muestra	ST		SV	
		Inicial (mg/L)	Final (mg/L)	Inicial (mg/L)	Final (mg/L)
1	Entrada (1)	9436.67	6066.67	7696.67	4223.33
	Entrada (2)	10100.00	5773.33	8253.33	4000.00
	Entrada (3)	7990.00	5373.33	6403.33	3700.00
	Salida (1)	5153.33	4153.33	4246.67	3343.33
	Salida (2)	5660.00	3850.00	4790.00	3123.33
	Salida (3)	4530.00	3543.33	3730.00	2820.00
2	Entrada (1)	6336.67	5650.00	5336.67	4763.33
	Entrada (2)	6403.33	2130.00	5380.00	1633.33
	Entrada (3)	6803.33	5320.00	5806.67	4403.33
	Salida (1)	4333.33	3066.67	3653.33	2360.00
	Salida (2)	5596.67	3311.67	4776.67	2695.00
	Salida (3)	4756.67	3526.67	3993.33	2980.00
3	Entrada (1)	4960.00	3426.67	3936.67	2340.00
	Entrada (2)	4860.00	3830.00	3813.33	2683.33
	Entrada (3)	3880.00	3003.33	2640.00	2290.00
	Salida (1)	4846.67	3676.67	3750.00	2540.00
	Salida (2)	4976.67	3793.33	3853.33	1473.33
	Salida (3)	4733.33	3720.00	3666.67	2466.67

Tabla B6. Datos de pH por repetición para muestras frescas.

Planta	Repetición	Salida	Promedio	Entrada	Promedio
Industria vacuna	1	6.95		6.78	
	2	6.92	6.84	6.46	6.59
	3	6.64		6.52	
Industria avícola	1	8.67		8.30	
	2	8.22	8.37	7.32	7.59
	3	8.22		7.15	
Industria palma aceitera	1	7.32		4.42	
	2	7.38	7.35	4.59	4.48
	3	7.35		4.43	
Industria cárnica	1	8.7		5.78	
	2	8.5	8.47	6.27	6.12
	3	8.3		6.30	

Tabla B7. Datos de pH para PBM en repetición uno.

Planta	Muestra	Repetición	Inicial	Final	Cambio
Industria vacuna	Entrada	1	6.51	6.78	-0.27
		2	6.55	6.72	-0.17
		3	6.60	6.46	0.14
	Salida	1	6.14	6.70	-0.56
		2	7.03	6.52	0.51
		3	6.80	6.93	-0.13
Industria avícola	Entrada	1	8.47	8.37	0.10
		2	8.36	8.05	0.31
		3	8.34	8.00	0.34
	Salida	1	8.38	8.28	0.10
		2	8.41	8.26	0.15
		3	8.44	8.27	0.17
Industria palma aceitera	Entrada	1	6.68	6.89	-0.21
		2	6.85	6.89	-0.04
		3	6.66	6.90	-0.24
	Salida	1	7.08	7.55	-0.47
		2	7.11	7.54	-0.43
		3	7.15	7.57	-0.42
Industria cárnica	Entrada	1	7.04	7.19	-0.15
		2	7.05	7.16	-0.11
		3	7.02	7.16	-0.14
	Salida	1	6.33	7.58	-1.25
		2	6.28	6.78	-0.50
		3	6.28	6.75	-0.47

Tabla B8. Datos de pH para PBM en repetición dos.

Planta	Muestra	Repetición	Inicial	Final	Cambio
Industria vacuna	Entrada	1	6.61	6.86	-0.25
		2	7.75	6.89	0.86
		3	7.64	6.87	0.77
	Salida	1	7.59	6.93	0.66
		2	7.19	6.93	0.26
		3	6.75	6.88	-0.13
Industria avícola	Entrada	1	8.38	8.04	0.34
		2	8.38	8.07	0.31
		3	8.38	8.11	0.27
	Salida	1	8.39	8.22	0.17
		2	8.43	8.19	0.24
		3	8.45	8.21	0.24
Industria palma aceitera	Entrada	1	6.82	7.03	-0.21
		2	6.77	7.08	-0.31
		3	7.85	7.07	0.78
	Salida	1	7.33	7.20	0.13
		2	7.47	7.33	0.14
		3	7.21	7.33	-0.12
Industria cárnica	Entrada	1	7.04	7.12	-0.08
		2	7.02	7.06	-0.04
		3	7.03	7.02	0.01
	Salida	1	7.15	6.92	0.23
		2	7.14	6.85	0.29
		3	7.15	6.83	0.32

Tabla B9. Datos de pH para PBM en repetición tres.

Planta	Muestra	Repetición	Inicial	Final	Cambio
Industria vacuna	Entrada	1	7.15	6.95	0.20
		2	7.24	7.84	-0.60
		3	7.13	6.99	0.14
	Salida	1	7.14	6.56	0.58
		2	7.16	7.06	0.10
		3	7.11	6.80	0.31
Industria avícola	Entrada	1	8.28	8.04	0.24
		2	8.27	8.27	0.00
		3	8.26	8.04	0.22
	Salida	1	8.35	8.23	0.12
		2	8.32	8.23	0.09
		3	8.32	8.24	0.08
Industria palma aceitera	Entrada	1	7.39	6.85	0.54
		2	7.93	6.84	1.09
		3	7.01	6.89	0.12
	Salida	1	7.72	7.24	0.48
		2	7.29	7.23	0.06
		3	7.95	7.20	0.75
Industria cárnica	Entrada	1	8.28	7.21	1.07
		2	8.01	7.12	0.89
		3	7.84	7.14	0.70
	Salida	1	8.16	7.50	0.66
		2	8.08	7.46	0.62
		3	8.09	7.50	0.59

Tabla B10. Datos de DQO para muestras frescas.

Muestra	Repetición	ID	Factor de dilución	DQO (mg/L)	DQO real (mg/L)
Industria	a	7	49	1287	63063
avícola	b	8	49	1253	61397
Entrada	c	9	49	1414	69286
Industria	a	10	10	1231	12310
avícola	b	11	10	1270	12700
Salida	c	12	10	1225	12250
Industria	a	22	49	963	47187
palma	b	23	49	949	46501
aceitera	c	24	49	918	44982
Entrada	a	25	10	687	6870
palma	b	26	10	681	6810
aceitera	c	27	10	669	6690
Industria	a	16	90	793	71370
cárnica	b	17	90	774	69660
Entrada	c	18	90	803	72270
Industria	a	19	49	740	36260
cárnica	b	20	49	672	32928
Salida	c	21	49	703	34447
Industria	a	1	3	275	825
vacuna	b	2	3	288	864
Entrada	c	3	3	189	567
Industria	a	4	10	304	3040
vacuna	b	5	10	251	2510
Salida	c	6	10	241	2410

Tabla B11. Parámetros estadísticos para plantas de escala industrial.

Parámetro	Industria palma aceitera			Industria cárnica		
	1	2	3	1	2	3
SSE	687.4	889.62	547.5	4500	106.7	2150
R ²	0.9258	0.9362	0.974	0.9975	0.9978	0.9747
RMSE	6.359	7.028	5.515	15.81	2.435	10.93

Tabla B12. Parámetros estadísticos para plantas de escala mediana.

Parámetro	Industria avícola			Industria vacuna		
	1	2	3	1	2	3
SSE	1.52E+04	412.2	337.9	36.84	34.69	16.94
R ²	0.9945	0.9896	0.992	0.9569	0.9863	0.8743
RMSE	25.3	4.785	4.458	1.431	1.388	0.9702

ANEXO C: Código de simulación de producción de Biogás en Matlab.

```
function [fitresult, gof] = createFits2(XC2, YC2, XC1, YC1, XC3, YC3)
%CREATEFITS1(XC2,YC2,XC1,YC1,XC3,YC3)
% Create fits.
% Data for 'Industria Palma aceitera' fit:
% Output:
XC1 = [0 28.3333 94.3333 109.3333 167.3333 191.2667 263.8333 287.3333 315.3333
324.4500 382.0000 453.0667 480.5333 503.3333 527.5833 603.8333 623.8500 647.1667
675.3333 724.0000];
YC1 = [1.6667 11.6667 47.6667 50.0000 50.0000 51.3333 59.0000 66.0000 67.6667
68.3333 68.3333 68.6667 72.6667 72.6667 76.6667 78.0000 82.0000 82.0000 82.0000
82.0000];
[xData, yData] = prepareCurveData( XC1, YC1);
% Set up fitype and options.
ft = fitype( 'a*exp(-b*exp(-c*x))', 'independent', 'x', 'dependent', 'y' );
opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
opts.Display = 'Off';
opts.StartPoint = [0.743132468124916 0.392227019534168 0.655477890177557];
% Fit model to data.
[fitresult{1}, gof(1)] = fit( xData, yData, ft, opts );
% Plot fit with data.
plot( xData, yData,'g*');
hold on
% Label axes
xlabel( 'XC1', 'Interpreter', 'none' );
ylabel( 'YC1', 'Interpreter', 'none' );
%% Fit: 'Industria Palma aceitera 2'.
XC2 = [ 0 23.6667 96.1667 120.1667 148.0833 169.0000 214.3333 285.3333 313.0000
335.6667 361.9167 424.3000 456.3333 479.5000 507.6667 531.6667 599.6667 623.6667
671.6667 695.6667 767.6667];
YC2 = [2.0000 26.3333 68.6667 79.0000 79.0000 82.6667 84.0000 84.3333 88.0000
88.0000 94.3333 96.3333 99.0000 99.0000 99.0000 101.3333 104.0000 104.0000
105.6667 107.6667 107.6667];
[xData, yData] = prepareCurveData( XC2, YC2 );
% Set up fitype and options.
ft = fitype( 'a*exp(-b*exp(-c*x))', 'independent', 'x', 'dependent', 'y' );
opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
opts.Display = 'Off';
opts.StartPoint = [0.407851973993508 0.883531575925757 0.0978295548916928];
% Fit model to data.
[fitresult{2}, gof(2)] = fit( xData, yData, ft, opts );
% Plot fit with data.
plot(xData, yData, 'm+');
% Label axes
xlabel( 'XC2', 'Interpreter', 'none' );
ylabel( 'YC2', 'Interpreter', 'none' );
```

```

%% Fit: 'Industria Palma aceitera 3'
XC3 = [0 24.0000 92.5000 115.6667 164.3333 186.5000 260.8333 287.7500 309.8333
355.3167 429.0000 451.1667 475.8333 499.8333 523.8333 595.8333 619.8333 643.8333
667.8333 691.8333 719.8333];
YC3 = [11.0000 30.0000 77.3333 91.6667 102.6667 107.0000 110.0000 113.6667
113.6667 118.0000 121.3333 121.6667 124.6667 124.6667 126.0000 129.0000 129.3333
131.3333 131.3333 131.3333 131.3333];
[xData, yData] = prepareCurveData( XC3, YC3 );
% Set up fitype and options.
ft = fitype( 'a*exp(-b*exp(-c*x))', 'independent', 'x', 'dependent', 'y' );
opts = fitoptions( 'Method','NonlinearLeastSquares' );
opts.Display = 'Off';
opts.StartPoint = [0.387431279765948 0.777688046420786 0.582016170348645];
% Fit model to data.
[fitresult{3}, gof(3)] = fit( xData, yData, ft, opts );
% Plot fit with data.
plot(xData, yData,'o');
plot( fitresult{3},'k');
plot( fitresult{2},'k');
plot( fitresult{1},'k');
% Label axes
xlabel( 'Tiempo (h)', 'Interpreter', 'none' );
ylabel( 'Volumen de Gas Acumulado (mL)', 'Interpreter', 'none' );
hold off
legend('Industria Palma aceitera 1','Industria Palma aceitera 2','Industria Palma aceitera
3','Modelo de Gompertz', 'Location', 'NorthEast');

```

ANEXO D: Metodología AMFE

Tabla D1. Metodología AMFE para proceso de producción de biogás en planta de industria vacuna.

AMFE	Proyecto:	Proceso: X	Medio:	Componente/parte del proceso:			
Nombre/Dpto: Biodigestor		Fecha de inicio:	Fecha de revisión:	Nombre coordinador:			
Etapa	Fallo Potencial			Estado actual			
	Modo o Descripción de la falla	Efectos	Causa	G	F	D	NPR
1	Falta de protección para aislantes térmicos	Daños físicos y químicos	Roedores, fricción mecánica	5	5	3	75
2	No se cuenta con control de la temperatura	Baja eficiencia de producción	Muerte de microorganismos	5	5	5	125
2	No se cuenta con plano de las instalaciones	Desconocimiento de detalles de construcción, mecánicos y eléctricos	Criterios de diseño y construcción poco controlados	5	5	5	125
2	No se cuenta con un mapeo de flujo de proceso	Desconocimiento de detalles mecánicos y eléctricos referentes al proceso	Criterios de diseño y construcción poco controlados	5	5	5	125
2	No se cuenta con registro de extracción	Baja eficiencia de producción	Sobrecarga microbiológica, de sustrato o líquido	5	5	5	125
2	No se realiza mantenimiento y calibración de equipos	Problemas mecánicos en el flujo de proceso	Deterioro de los equipos	5	5	5	125
2	No se cuenta con un registro de inspecciones	Funcionamiento inadecuado de equipos	No existe un protocolo	5	5	5	125
3	Cantidad de ST muy inferiores al 2%	Disminución en producción de biogás	Falta de sustrato dentro del biodigestor	5	4	3	60

Tabla D1. Metodología AMFE para proceso de producción de biogás en planta de industria vacuna. Continuación.

Etapa	Fallo Potencial			Estado actual			
	Modo o Descripción de la falla	Efectos	Causa	G	F	D	NPR
4	No se cuenta con dispositivo de control automático de llama	Riesgo de explosión para la fuente o almacenamiento de biogás	Diseño inadecuado del sistema	5	5	5	125
4	No se respetan distancias a sitios con riesgo	Riesgo de explosión para la fuente o almacenamiento de biogás	Diseño inadecuado del sistema	5	5	3	75
4	No se respeta altura de antorcha	Riesgo de explosión para la fuente o almacenamiento de biogás	Diseño inadecuado del sistema	4	5	5	100
4	No se cierra la válvula de suministro manual o automáticamente	Riesgo de explosión para la fuente o almacenamiento de biogás	Diseño inadecuado del sistema	5	5	5	125
8	No se tiene sistema de purga o control de olores	Contaminación ambiental/Riesgo salud humana	Diseño inadecuado del sistema	5	5	4	100
9	No se cuenta con planos que identifique zonas de peligro	Riesgo de explosión, contaminación, riesgo salud humana	Nula gestión y prevención de riesgos	5	5	4	100
9	No se cuenta con plan de protección contra explosiones	Riesgo de explosión, contaminación, riesgo salud humana	Nula gestión y prevención de riesgos	5	5	4	100
9	No se cuenta con registro de sustancias peligrosas	Riesgo de contaminación, riesgo salud humana	Nula gestión y prevención de riesgos	5	5	4	100
9	No se cuenta con señalización de prevención y seguridad	Riesgo de explosión, contaminación, riesgo salud humana	Nula gestión y prevención de riesgos	5	5	2	50
9	Falta de conocimiento y experiencia por parte de los operarios	Riesgo, pérdida en calidad y producción de biogás	Nula gestión y prevención de riesgos	5	4	3	60

Tabla D1. Metodología AMFE para proceso de producción de biogás en planta de industria vacuna. Continuación.

Etapa	Fallo Potencial			Estado actual			
	Modo o Descripción de la falla	Efectos	Causa	G	F	D	NPR
9	Falta de conocimiento y experiencia por parte de los operarios	Riesgo, perdida en calidad y producción de biogás	Nula gestión y prevención de riesgos	5	4	3	60
9	Falta de conocimiento y experiencia por parte de los operarios	Riesgo, perdida en calidad y producción de biogás	Nula gestión y prevención de riesgos	5	4	3	60
9	No se cuenta con señalización de equipos y protección adecuada	Riesgo de explosión, contaminación, riesgo salud humana	Nula gestión y prevención de riesgos	4	5	3	60
9	No se cuenta con tuberías identificadas con código de color	Problemas para realizar mantenimiento y encontrar fugas	Criterios de diseño y construcción poco controlados	4	5	1	20
9	No se cuenta con tuberías identificadas, señalizadas o demarcadas	Problemas para realizar mantenimiento y encontrar fugas	Criterios de diseño y construcción poco controlados	4	5	1	20
9	No cuenta con dispositivo que evite retroceso de llama al biodigestor	Riesgo de explosión, contaminación, riesgo salud humana	Nula gestión y prevención de riesgos	5	5	5	125
9	No se tiene plan de bioseguridad	Riesgo a salud humana	Nula gestión y prevención de riesgos	5	5	4	100
9	No se tiene plano con zona de atmósfera explosiva	Riesgo de explosión, contaminación, riesgo salud humana	Nula gestión y prevención de riesgos	5	5	4	100
9	No se tienen equipo e instalaciones a prueba de explosiones	Riesgo de explosión, contaminación, riesgo salud humana	Nula gestión y prevención de riesgos	5	5	4	100
11	No se realiza postratamiento a efluentes	Contaminación ambiental y biológica	Nula gestión y prevención de riesgos	5	5	5	125

Tabla D2. Metodología AMFE para proceso de producción de biogás en planta de industria avícola.

AMFE	Proyecto:	Proceso: X	Medio:	Componente/parte del proceso:			
Nombre/Dpto: Biodigestor		Fecha de inicio:	Fecha de revisión:	Nombre coordinador:			
Etapa	Fallo Potencial			Estado actual			
	Modo o Descripción de la falla	Efectos	Causa	G	F	D	NPR
1	Falta de protección para aislantes térmicos	Daños físicos y químicos	Roedores, fricción mecánica	5	4	3	60
1	Materiales de protección no son resistente a condiciones climáticas (protección estructural deficiente)	Daños físicos y químicos	Factores climáticos (lluvias, radiación, viento)	5	4	3	60
1	Materiales en contacto con el biogás no son aptos	Daños físicos y químicos	Tasa de corrosión alta y condiciones ambientales	5	4	3	60
2	No se tiene plano de las instalaciones	Desconocimiento de detalles de construcción, mecánicos y eléctricos	Criterios de diseño y construcción poco controlados	5	4	3	60
2	No se tiene un mapeo de flujo de proceso	Desconocimiento de detalles mecánicos y eléctricos referentes al proceso	Criterios de diseño y construcción poco controlados	5	4	3	60
2	No se tiene registro de extracción	Baja eficiencia de producción	Sobrecarga microbiológica, de sustrato o líquido	5	4	3	60
2	No se cuenta con manual de operación de equipo, no se realiza mantenimiento y calibración de equipos	Problemas mecánicos en el flujo de proceso	Deterioro de los equipos	5	4	3	60

Tabla D2. Metodología AMFE para proceso de producción de biogás en planta de industria avícola. Continuación.

Etapa	Fallo Potencial			Estado actual			
	Modo o Descripción de la falla	Efectos	Causa	G	F	D	NPR
2	No se documentan inspecciones y resultados	Desconocimiento de detalles mecánicos y eléctricos referentes al proceso	Criterios de diseño y construcción poco controlados	5	4	2	40
2	No se elimina vapor de agua presente en el biogás	Obstrucción de tuberías	Acumulación de condensado de agua	5	4	2	40
3	Valor de pH por debajo de 7	Problemas de inhibición, disminución de producción en biogás	Cambio de pH muy brusco al entrar al biodigestor	5	5	3	75
3	Cantidad de ST superiores al 2%	Inhibición microbiana, disminución en producción de biogás	Sobrealimentación del biodigestor	5	4	2	40
3	Cantidad de H ₂ S perjudicial para el sistema	Disminución en producción de biogás, daños potenciales para el sistema	Cantidades excesivas de H ₂ S en el biogás	5	4	3	60
4	No se respetan distancias a sitios con riesgo	Riesgo de explosión para la fuente o almacenamiento de biogás	Diseño inadecuado del sistema	5	4	4	80
4	Antorcha colocada incorrectamente	Peligro de explosión /daños físicos a la planta	Criterios de diseño y construcción poco controlados	5	4	4	80
4	El quemador solo cubre el 20% de la producción	Peligro de fugas, daños físicos o explosión	Criterios de diseño y construcción poco controlados	5	4	2	40
6	No se cuenta con tuberías identificadas con código de color	Problemas para realizar mantenimiento y encontrar fugas	Criterios de diseño y construcción poco controlados	5	3	2	30

Tabla D2. Metodología AMFE para proceso de producción de biogás en planta de industria avícola. Continuación.

Etapa	Fallo Potencial			Estado actual			
	Modo o Descripción de la falla	Efectos	Causa	G	F	D	NPR
6	No se cuenta con tuberías identificadas con código de color	Problemas para realizar mantenimiento y encontrar fugas	Criterios de diseño y construcción poco controlados	5	3	2	30
9	No se cuenta con plan de protección contra explosiones	Riesgo de explosión, contaminación, riesgo salud humana	Nula gestión y prevención de riesgos	5	4	3	60
10	No se tiene control de malos olores	Daños físicos y biológicos para el sistema	Proliferación de plagas	5	4	2	40
10	No se controla la cantidad de H ₂ S presente en el biogás	Daños funcionales potenciales para el sistema, contaminación, riesgo salud humana	Inexistencia de filtrado de H ₂ S	5	4	3	60
10	No se cuenta con un control o sistema de tratamiento para sustratos putrescibles	Daños físicos y microbiológicos para el sistema	Proliferación de plagas	5	4	3	60
11	No se realiza postratamiento a efluentes	Contaminación ambiental y biológica	Nula gestión y prevención de riesgos	5	5	5	125

Tabla D3. Metodología AMFE para proceso de producción de biogás en planta de industria cárnica.

AMFE	Proceso: X	Proyecto:	Medio:	Componente/parte del proceso:			
Nombre/Dpto: Biodigestor		Fecha de inicio:	Fecha de revisión:	Nombre coordinador:			
Etapa	Fallo Potencial			Estado actual			
	Modo o Descripción de la falla	Efectos	Causa	G	F	D	NPR
4	El quemador solo cubre el 20% de la producción	Peligro de fugas, daños físicas o explosión	Criterios de diseño y construcción poco controlados	5	4	3	60
3	Cantidad de ST superiores al 2%	Inhibición microbiana, disminución en producción de biogás	Sobrealimentación del biodigestor	5	4	3	60
3	Cantidad de H ₂ S perjudicial para el sistema	Disminución en producción de biogás, daños potenciales para el sistema	Cantidades excesivas de H ₂ S en el biogás	5	4	3	60
6	Las presiones alcanzan hasta 3 PSI	Daño físico en las tuberías	Diseño inadecuado del sistema con riesgo de sobrepresión	4	5	3	60

Tabla D4. Metodología AMFE para proceso de producción de biogás en planta de industria palma aceitera.

AMFE	Proyecto:	Proceso: X	Medio:	Componente/parte del proceso: Biodigestor			
Nombre/Dpto: Biodigestor		Fecha de inicio:	Fecha de revisión:	Nombre coordinador:			
Etapa	Fallo Potencial			Estado actual			
	Modo o Descripción de la falla	Efectos	Causa	G	F	D	NPR
2	Tiempo de retención hidráulico muy bajo	Cambios en la dinámica poblacional del biodigestor	Disminuye presencia de organismos metanogénicos	4	5	3	60
2	No se realiza mantenimiento y calibración de equipos	Problemas mecánicos en el flujo de proceso	Deterioro de los equipos	5	5	5	125
3	Valor de pH por debajo de 7	Problemas de inhibición, disminución de producción en biogás	Cambio de pH muy brusco al entrar al biodigestor	5	5	3	75
3	Cantidad de ST superiores al 2%	Inhibición microbiana, disminución en producción de biogás	Sobrealimentación del biodigestor	5	4	3	60
3	Cantidad de H ₂ S perjudicial para el sistema	Disminución en producción de biogás, daños potenciales para el sistema	Cantidades excesivas de H ₂ S en el biogás	5	4	3	60
4	No se cuenta con antorcha	Sobrepresión, contaminación ambiental	No se realiza quema del excedente de biogás	5	5	5	125
7	Filtro de H ₂ S no funciona	Daños funcionales potenciales para el generador eléctrico	Cantidades excesivas de H ₂ S en el biogás	5	5	4	100
8	El biodigestor no cuenta con estructura de protección	Pérdida de biogás/Fugas descontroladas	Daños físicos en la carpa causados por condiciones ambientales	4	5	3	60

Tabla D4. Metodología AMFE para proceso de producción de biogás en planta de industria palma aceitera. Continuación.

Etapa	Fallo Potencial			Estado actual			
	Modo o Descripción de la falla	Efectos	Causa	G	F	D	NPR
9	No se cuenta con planos que identifique zonas de peligro	Riesgo de explosión, contaminación, riesgo salud humana	Nula gestión y prevención de riesgos	5	4	3	60
9	No se cuenta con plan de protección contra explosiones	Riesgo de explosión, contaminación, riesgo salud humana	Nula gestión y prevención de riesgos	5	4	3	60
9	No se cuenta con registro de sustancias peligrosas	Riesgo de contaminación, riesgo salud humana	Nula gestión y prevención de riesgos	5	4	3	60
9	No se cuenta con tuberías identificadas con código de color	Problemas para realizar mantenimiento y encontrar fugas	Criterios de diseño y construcción poco controlados	4	5	3	60
9	No se cuenta con tuberías identificadas, señalizadas o demarcadas	Problemas para realizar mantenimiento y encontrar fugas	Criterios de diseño y construcción poco controlados	4	5	3	60
9	No se cuenta con seguridad en instalación eléctrica y protección contra rayos	Daños funcionales potenciales para el generador eléctrico	Sobrecarga/explosión causada por fenómenos naturales	4	5	3	60
9	No se cuenta con antorcha activa	Sobrepresión/Daños funcionales del digestor, contaminación, riesgo salud humana	Criterios de diseño y construcción poco controlados	5	5	3	75
9	No se tienen equipo e instalaciones a prueba de explosiones	Riesgo de explosión, contaminación, riesgo salud humana	Nula gestión y prevención de riesgos	4	5	3	60
11	No se tiene una disminución efectiva de H ₂ S presente en el biogás	Daños funcionales potenciales para el generador eléctrico, contaminación, riesgo salud humana	Funcionamiento nulo del filtro de H ₂ S	5	5	3	75