



**ANÁLISIS DE LA FORMACIÓN DE UNA BIOPELICULA PARA EL
TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS POR BIODIGESTIÓN ANAEROBIA**

ESTUDIANTES

STEFANY ALEXANDRA GUATEQUE BELTRAN

MARÍA ALEJANDRA GARCÍA SÁNCHEZ

KAREN GARCÉS PALACIOS

DOCENTE

JOHANNA KARINA SOLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE GRADO – PROYECTO DE INTEGRACIÓN

UNIVERSIDAD EAN

BOGOTÁ D.C

2025

AGRADECIMIENTOS



No es sencillo recordar a todos aquellos que han aportado en el trayecto y pido disculpas a aquellos a los que no tuve la oportunidad de mencionar. Iniciaré agradecimiento a nuestras familias, padres y hermanas que desde nuestras infancias siempre han sido esenciales para el crecimiento y la motivación para continuar por el camino de la vida, infundiéndome diversos valores vitales para nuestro desarrollo personal.

Para la directora del proyecto, La Sr. Johanna Karina Solano que ha sido clave, jugando un papel crucial en este proyecto académico, brindando su conocimiento, apoyo para aclarar nuestras ideas y no dejarnos agobiar.

Finalmente quiero agradecer a cada una de mis compañeras en este trayecto académico, su humildad, optimismo y respaldo han sido factores fundamentales para hacer llevadero este camino.

RESUMEN EJECUTIVO



La gestión inadecuada de residuos sólidos en Bogotá ha generado serios problemas ambientales y de salud pública debido a la contaminación por lixiviados. La acumulación de estos contaminantes afecta el suelo, el agua y el aire, incrementando los riesgos para la biodiversidad y las comunidades cercanas. Este proyecto se basó en analizar la biodigestión anaerobia para lixiviados como una alternativa innovadora y sostenible para la remoción de carga orgánica y formación de combustible a través de un estudio experimental desarrollado en la Universidad EAN, donde se evalúa la eficiencia de fijación de biopelículas en un soporte de ácido poliláctico (PLA) y su influencia en la producción de biogás. La investigación se centró en la caracterización fisicoquímica de diferentes combinaciones de materia orgánica como lo son el lixiviados, el estiércol y la biomasa de acaí y su vez la interacción de estos con la biopelícula.

INTRODUCCIÓN



En Bogotá la gestión de los residuos sólidos ha sido una preocupación constante por el impacto a nivel ambiental y de salud pública que esto genera, ya que no se manejan adecuadamente y son fuentes altamente contaminantes del suelo, aire y agua por la generación de lixiviados. Lo que conlleva a una necesidad urgente para mitigar los impactos negativos que este fluido tóxico genera en las matrices ambientales.

En el caso específico del relleno sanitario Doña Juana, ubicado cerca al a capital colombiana, es un claro ejemplo de los desafíos que enfrenta la gestión de los residuos sólidos en la ciudad. Al pasar los años, la operación de este relleno ha presentado desafíos debido a la cantidad de toneladas que recibe mensualmente. Diariamente por cada habitante de esta ciudad se produce 1 kilogramo de basura diaria y en Bogotá hay casi 2.612.000 habitantes (Toneladas, 2024) La acumulación de residuos y por ende la generación de los lixiviados han puesto en evidencia la necesidad de desarrollar alternativas sostenibles para la gestión de los residuos.

Por ello es fundamental desarrollar alternativas tecnológicas económicas, eficientes y sostenibles que permitan la remoción de carga orgánica en los lixiviados dándoles una nueva gestión como generador de energía por sus alta carga de metano y dióxido de carbono debido a la descomposición de la materia orgánica de los rellenos sanitarios, por medio de la biodigestión anaerobia, que se presenta como una alternativa innovadora en este ámbito de la remoción de carga orgánica, ya que no requiere el uso de sustancias químicas adicionales y tienen un consumo energético bajo.



La implementación de la biodigestión anaerobia a escala piloto de los lixiviados, permitirá evaluar su viabilidad como una alternativa económica y sostenible para el tratamiento de los lixiviados. Este proyecto piloto servirá como base para futuras aplicaciones en sistemas con características similares, proporcionando datos valiosos sobre la eficiencia del proceso tanto en la formación de la biopelícula y en la formación de biogás.

Además de los beneficios en las matrices ambientales, la adopción de la biodigestión anaerobia en el relleno sanitario Doña Juana podría tener un impacto positivo en la salud pública de las comunidades aledañas, la reducción de los contaminantes contribuiría a disminuir los riesgos asociados con la exposición a estos tóxicos, mejorando su calidad de vida y también podría tener un impacto positivo por el ahorro de energía ya que este biogás al quemarse puede producir la activación de motores de energía eléctrica o mecánica en las instalaciones del relleno sanitario. (Curado, 2024)

Por otro lado, también tendría un impacto positivo a toda la fauna ya que se comenzaría a minimizar la contaminación en el agua, la cual beneficiaría a especies acuáticas y terrestres que dependen de estos recursos, se contribuiría a la recuperación de los hábitats naturales, permitiendo que las poblaciones de organismos acuáticos prosperen nuevamente. En cuanto a la flora, la rehabilitación del sistema arbóreo con el pasar de los años y la reducción de estos contaminantes proporcionaría un entorno más saludable.

La implementación de nuevas tecnologías en la gestión de residuos sólidos requiere un enfoque integral que considere no solo aspectos económicos, sino también sociales y



ambientales. Con ello esta investigación se centra en analizarla formación de biopelículas por biodigestión anaerobia como método de tratamiento para lixiviados, con el objetivo de desarrollar algo que contribuya al medio ambiente y la sociedad, siendo económicamente viable, eficiente y sostenible para la gestión de los residuos.



OBJETIVO GENERAL

Analizar la fijación de biopelículas por medio de soporte de PLA (Acido poliactico) para biodigestores anaerobios como alternativa para la remoción de carga orgánica y/o tratamiento de lixiviados.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la formación de biopelículas mediante la evaluación de condiciones microbiológicas durante su desarrollo
- Determinar la eficiencia del proceso de biodigestión anaerobia para la remoción de la carga orgánica en lixiviados
- Evaluar técnicamente el uso de soportes de PLA en biodigestor para aumentar la eficiencia operativa y la producción de biogás para la generación de energía.

PROBLEMÁTICA



Los contaminantes de los rellenos sanitarios hoy en día equivalen a una gran problemática ambiental, en especial los lixiviados, los cuales no tiene una gestión integral adecuada con el manejo de los residuos sólidos a nivel global, generando grandes fracturas en las matrices ambientales, aire, suelos, agua como también las comunidades aledañas afectando su calidad de vida. (Quintero Ramírez,2017).

El manejo de los residuos sólidos de la ciudad de Bogotá y de municipios como Une, Fosca, Ubaque, Chipaque, Choachí, Cáqueza entre otros, es uno de los temas más significativos que afectan los componentes ambientales, con el pasar de los años desde la década de los 80 cuando se rompió el equilibrio de la población y se pasó a ser sobrepoblación lo que conlleva a consumir más recursos y dio como resultado el hiperconsumismo, agravado por la falta de conciencia ambiental por parte de la población, repercutiendo en la cantidad de residuos que llega al relleno sanitario y la disposición de ellos en las aguas residuales. (Salazar, 2018.)

El origen de la carga orgánica en los rellenos sanitarios se da por la descomposición de materia orgánica, también los macros componentes inorgánicos (incluyendo nutrientes), componentes orgánicos xenobióticos, los cuales si no son recolectados correctamente y tratados pueden causar serios problemas en los cuerpos de agua superficiales y subterráneas. Los lixiviados de los rellenos suelen ser contaminados por diferentes factores, en términos de materia orgánica, es decir (DQO y DBO), nitrógeno, principalmente en forma de (NH_4 , NO_3 Y N) y elementos potencialmente tóxicos. (Mohammad et al., 2023) La materia orgánica es



de origen doméstico, empresarial e industrias alimenticias, como los restos de comida, aceites o a veces hasta animales muertos los cuales su disposición final en la mayoría de los casos son los rellenos sanitarios.

Los rellenos sanitarios son espacios destinados para disposición final y fuente de descomposición de cualquier material sólido, donde el agua lluvia adquiere un papel importante, ya que esta ayuda a que hacer contacto con los sólidos y de este modo llegar a disolver cualquier compuesto, generando un fluido altamente contaminante que contiene carga orgánica disuelta, como también compuestos tóxicos, los cuales se filtran por las capas de residuos, acelerando su degradación dando lugar a la formación de lixiviados.

Esta carga orgánica disuelta al ingresar a los cuerpos de agua superficiales y subterráneos de las zonas aledañas, pueden perturbar su estabilidad e incluso impactar a las especies acuáticas, debido a la presencia excesiva de la materia orgánica, esta actúa como promotora para el crecimiento de microorganismos que consumen el oxígeno con el fin de descomponerla, este proceso puede llevar a una disminución de los niveles de oxígeno disponibles para otra forma de vida acuática, pudiendo resultar en la muerte de peces y otros organismos acuáticos por otro lado es causal de un fenómeno excesivo de crecimiento de algas y plantas acuáticas llamada en pocas palabras la eutrofización (Instituto de las Aguas, 2024)-.

La situación es similar para la matriz aire, los rellenos sanitarios a cielo abierto denota la producción de principalmente de metano y dióxido de carbono, que al ser liberado es factor principal para el calentamiento global, por otro lado la calidad de aire de estas zonas en cuanto



a los olores pueden causar enfermedades como asma, bronquitis, también la carga orgánica disuelta en aguas subterráneas y superficiales es causal de la proliferación de patógenos generando riesgos a la salud humana, son causas de enfermedades como; salmonela, diarrea, colera, hepatitis A y fiebre tifoidea (World Health Organization, 2020)

JUSTIFICACIÓN

Los rellenos sanitarios son diseñados con la intención de dar mejoras innovadoras y tecnológicas a problemas ambientales que se desarrollan a lo largo del tiempo en ciudades como Bogotá frente a la generación de residuos sólidos, sin embargo, por la mala gestión y disposición final de los residuos sólidos su desarrollo es muy diferente al que se espera, tanto que su paisaje trasmite una imagen desagradable para los ciudadanos generando un paisaje toxico y la aparición de nuevos y más peligrosos residuos como lixiviados y gases. (Molano et al., 2019)

Por esta razón estos rellenos suelen ser clausurados más de una vez. Hoy día se implementan tecnologías modernas como el tratamiento de lixiviados por medio de biodigestores en ciudades grandes y totalmente desarrolladas para reducir los impactos al medio ambiente, sin embargo, en ciudades en vía de desarrollo metodologías como estas son muy escasas, debido a costos y falta de infraestructura, adicionalmente estudios evidencian que la generación mundial de residuos urbanos es de 7 mil millones y 10 mil millones de toneladas anuales en donde la porción orgánica representa el 50-70% en los países de bajo recursos, por lo cual es importante el análisis de estos tratamientos que contribuyen a una



mayor eficiencia en la remoción de dichos factores orgánicos especialmente en los lixiviados que van apareciendo en el tiempo después de la disposición final de estos residuos urbanos en los rellenos sanitarios. (Santana et al, 2020)

Además, se evidencia una disminución en la disponibilidad de tierras en los últimos años, por ende, metodologías tradicionales como rellenos sanitarios ya no son eficientes y mucho menos sostenibles, y otras alternativas como el compostaje y la incineración se convierten en métodos poco eficientes y sostenibles para las necesidades de aumento poblacional que se vienen desarrollando en los últimos años.

En este contexto la digestión anaerobia se convierte en un proceso no convencional muy conveniente actualmente para el tratamiento tanto de residuos solios directamente como para el tratamiento de lixiviados frente a su carga orgánica, gracias a esta capacidad de tratar alta carga orgánica puede producir energía, en donde se recuperan productos importantes y al mismo tiempo se reducen emisiones de GEI.

El usar biodigestores anaeróbicos como tratamiento para lixiviados representa una ventaja competitiva ambiental y económica frente al vertido, la incineración y otras tecnologías que pueden ser de valor energético. Además de que promueve una economía circular, sin embargo, se debe tener especial cuidado con los subproductos generados en este proceso ya que los lixiviado contienen todo tipo de compuestos aparte de DBO y DQO.

En ejemplos más cercanos frente al tratamiento de lixiviados en Colombia tenemos proyectos como GENESIS del relleno de doña Juana, el cual consiste en un sistema de



membrana con procesos de nanofiltración y ultrafiltración, no obstante, los precios de tratamiento son elevados debido a su sistema de membranas, para la gestión y mantenimiento de relleno doña Juana que recibe al mes cerca de 190 millones de residuos. (Castro Franco Andrés, 2024).

En consecuencia, se busca gestionar y desarrollar alternativas que pueden ser más económicas y eficientes que el proceso actual como lo es la biodigestión anaeróbica. Una de las innovaciones destacada en el proceso es la incorporación de polímeros como el ácido poliláctico (PLA) en la formación de biopelículas. Estas biopelículas tienen la capacidad de optimizar la eficiencia del proceso de biodigestión al proporcionar un soporte físico para los microorganismos anaeróbicos, lo que contribuye a su actividad y estabilidad en condiciones adversas. Esta metodología no solo mejora la tasa de degradación de los lixiviados, sino que también incrementa la generación de biogás y otros subproductos valiosos.

Además, la biodigestión anaeróbica destaca por su simplicidad tecnológica, ya que no requiere equipos complejos para su ejecución, lo que la hace accesible incluso para localidades con recursos limitados. Tiene un bajo consumo de energía en comparación con otras tecnologías de tratamiento de lixiviados, como la incineración, y contribuye directamente a la sostenibilidad ambiental al reducir la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas.

ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

Infraestructura



- Para la evaluación del proceso de biodigestión anaerobia para el tratamiento de lixiviados, se requiere principalmente de un laboratorio debido a que en este espacio se pueden desarrollar pruebas, analizar procesos con el fin de descubrir nuevas soluciones y poner a pruebas teorías e innovadoras ideas, un espacio para manipular equipos y almacenar nuestras muestras. El laboratorio asegura que las muertas estén en un lugar correcto, con sistemas de ventilación y finalmente cuenta con duchas de emergencia, extintores y kit de primeros auxilios por si llega a haber alguna calamidad.
- El laboratorio seleccionado; es el laboratorio de la Universidad EAN, en el área de “análisis químicos”, en este se realizará el proceso del análisis de la fijación en la biopelícula y la producción de gases, llevando a cabo un análisis biológico, fisicoquímico para conocer las propiedades del proceso.
- Servicios básicos de agua y electricidad

Materias primas

- **Materia orgánica:** Gracias al uso de este material, se puede extraer los lixiviados, debido al % de humedad que guardan en su interior, los cuales fueron obtenidos por usos domésticos, además se usó el agua lluvia, simulando el sistema de los rellenos para la formación de lixiviados.
- **Pilas:** Para poder simular las características de los lixiviados en cuanto a los metales pesados, se usaron pilas viejas que contienen metales pesados en su



interior, las cuales fueron recolectadas en nuestros trabajos y con ayuda de nuestros compañeros.

- Biodigestores: Se necesitan 3 botellas de plástico color ámbar
- Mangueras: Para unirla a las botellas con el fin de que salga el biogás producido
- Corchos: Para sellar bien las botellas
- Jeringas: Para hacer pasar el gas

Equipos

- Para el análisis de las biopelículas: Se hará por medio de un análisis de condiciones microbiológicas.
 - Agar nutritivo: Para bacterias
 - Agar PDA: Para hongos
 - Cajas de Petri: Para hacer cultivos
 - Microscopio: Se va a realizar la identificación de estructuras que se obtengan.
 - Reactivos de gram
 - Azul de metileno
 - Para el análisis de humedad y ceniza:
 - Horno: a 45°C para el secado de la muestra
 - Molienda: Se utilizará la licuadora para pulverizar los materiales para obtener una mezcla homogénea



- Macerado: Para macerar la muestra ya pulverizada para llevar al reactor evitando tener cúmulos grandes
- Tamices
- Crisoles: Se usarán para depositar la muestra ya tamizada
- Secado: A 105°C al horno por 24 horas
- Desecadores: Donde se dejará reposar la muestra por 1 hora
- Mufla: Para elevar la temperatura sobre las muestras
 - Para el análisis de Sólidos suspendidos:
- Papel filtro: para cubrir el embudo
- Capsula de porcelana
- Bomba al vacío
- Probeta de 100ml para mantener la muestra
- Horno a 103°C-105°C

Personal

- Personal del área técnica: Para la evaluación fisicoquímica, se requiere la ayuda de un profesional de ingeniería química, para la puesta en marcha de los laboratorios de la medición humedad y temperatura, también personal en el área de microbiología para el análisis de condiciones microbiológicas
- Técnicos de laboratorio: En el análisis para los resultados lixiviados, es necesario el uso de laboratorios químicos, para esto se requiere contar con el apoyo de técnicos de



laboratorio quienes faciliten la obtención de cada uno de los materiales y certifiquen el buen uso del espacio.

- Operarios de producción: Para manejar los equipos
- Personal de mantenimiento: Para garantizar el correcto funcionamiento de los equipos del laboratorio.

Requerimiento de software y gestión de datos

- **Excel:** Para registro de datos de laboratorio y gráficos iniciales.
- Base de datos Universidad EAN y otras herramientas de búsqueda
- **R studio:** Para el análisis de artículos
- **Mendeley:** Gestión de bibliografía

Condiciones ambientales del laboratorio

La calidad del entorno físico en el cual se realiza la experimentación tiene un impacto importante en los resultados obtenidos, especialmente cuando se trabaja con procesos biológicos como la digestión anaerobia. Por ende, uno de los requerimientos fundamentales es asegurar que el laboratorio disponga de una temperatura ambiente controlada, idealmente entre 20°C y 25°C, para evitar alteraciones en la activi

Gestión de residuos generados

Se requiere la manipulación adecuada y disposición correcta de los residuos generados

Tipos de residuos generados:

- Residuos orgánicos sólidos post-digestión.



- Cultivos microbiológicos (bacterias y hongos).
- Reactivos químicos agotados.
- Envases contaminados (plásticos, vidrios, etc.).
- Residuos peligrosos (metales pesados de pilas, colorantes, etc.).

Todos ellos deben contar con el envase correspondiente para desechar el material.

Elementos de protección personal

- Bata de laboratorio anti fluidos:
 - Manga larga y de uso exclusivo en el laboratorio.
 - Protege la piel y la ropa del contacto con sustancias químicas o lixiviados contaminados.
- Guantes de nitrilo:
 - Mayor resistencia frente a reactivos químicos y microorganismos.
 - Uso obligatorio para todas las manipulaciones.
 - Cambio frecuente para evitar contaminación cruzada entre materiales orgánicos, biológicos y químicos.
- Gafas de seguridad:
 - Protección contra salpicaduras.
 - Indispensables al trabajar con líquidos volátiles
- Tapabocas
- Gorro o cofia para el cabello



- Calzado cerrado

Requerimientos adicionales

Tener un kit de limpieza específico como hipoclorito, alcohol y toallas para limpiar, para poder realizar a desinfección de materiales y/o área de trabajo.

MARCO TEÓRICO

1. LIXIVIADOS

Los lixiviados generados en un relleno sanitario se encuentran entre los líquidos más contaminados y con mayor potencial de contaminación. Estos contienen elevadas concentraciones de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, además de una gran cantidad de patógenos y sustancias tóxicas, como metales pesados y otros compuestos peligrosos. Su liberación puede afectar cuerpos de agua subterráneos y superficiales, así como el suelo. (Guevara et al., 2014)

La formación de lixiviados está determinada por diversos factores, entre ellos la cantidad de precipitación pluvial, la humedad atmosférica y la temperatura, así como los procesos de evaporación y evapotranspiración. También influyen el escurrimiento, la infiltración y la capacidad de retención del relleno sanitario. Además, aspectos como el grado de compactación de los residuos, la humedad inicial de la basura y el material de cobertura de las celdas juegan un papel clave en su generación. (Méndez et al., 2004)

1.2 Relleno sanitario



Los rellenos sanitarios de acuerdo con la sociedad de Ingenieros Americana (ASCE), es una técnica para la disposición final de la basura en el suelo, este método utiliza principio de ingeniería para confinar basura en el suelo en la menor área posible y cubriendo la basura allí deposita con capas de tierra, disminuyendo el perjuicio al medio ambiente y la salud publica en comparación con los botaderos, los rellenos sanitarios constan de celdas previamente impermeabilizadas donde los residuos una vez depositados, compactados y nivelados los cuales finalmente son cubiertos con tierra.

Los subproductos derivados de la descomposición de los residuos corresponden a los lixiviados y el biogás, el cual es un subproducto debido a la descomposición anaerobia de los residuos. Los lixiviados son recolectados en el fondo de la celda por un sistema de conducto donde son posteriormente tratados o recirculados al interior del relleno sanitario. El biogás es recogido mediante redes subterráneas para incinerarlo convirtiéndolo en CO_2 y de esta manera disminuir la capacidad energética en cuando al calentamiento global. (De Ciencias Exactas Físicas y Naturales, 2010)

1.3 Residuos sólidos orgánicos

Los residuos corresponden al material del excedente en diferentes etapas, desde sus inicios (Producción) hasta el final (consumo) de cualquier producto o servicio provenientes de actividades antropogénicas. Dichos materiales pueden presentarse en todos los estados, líquidos solidos o gaseosos.



Los residuos sólidos ocupan una amplia gama, debido a que son generados en actividades diarias domésticas y empresariales los cuales corresponden a restos de frutas, carnes, verduras, los cuales contienen propiedades de descomposición por la actividad microbiológica al exponerse en el ambiente (Cornejo et al., 2017).

A nivel global, los residuos orgánicos representan 80 millones de toneladas anualmente, en Colombia diariamente se genera 27.500 toneladas de residuos sólidos orgánicos (Gladys et al., 2008).

1.4 Sistemas de tratamiento de los lixiviados

Según Luna, M. D. (2008) existen varios sistemas de tratamiento para los lixiviados, el primero es la recirculación que consiste en aprovechar el relleno sanitario como un reactor anaerobio a gran escala, permitiendo la conversión de los ácidos grasos presentes en el lixiviado en metano dentro del propio sistema. La recirculación de los lixiviados contribuye a incrementar la humedad de los residuos, lo que a su vez favorece una mayor producción de biogás. A medida que los ácidos grasos se transforman en metano, el pH del lixiviado se eleva, reduciendo la solubilidad de los metales y, por lo tanto, disminuyendo su concentración en la fase líquida transportada por el lixiviado. Este proceso permite una reducción significativa tanto de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) como de la cantidad de metales movilizados en el lixiviado. Así mismo se tiene el uso de la evaporación como método para el tratamiento de lixiviados representa una estrategia innovadora, similar a la implementación de humedales artificiales. Este enfoque aprovecha la energía contenida en el



biogás generado en el relleno sanitario para inducir la evaporación del lixiviado a través de un proceso de calentamiento controlado, reduciendo significativamente el volumen de lixiviados y generando un residuo sólido en forma de lodo, el cual puede ser reincorporado al sistema de disposición final.

Por otro lado, Giraldo, E. (2001) nos muestra que los sistemas naturales como las lagunas y los humedales artificiales son una alternativa de tratamiento que se caracterizan por su elevado tiempo de retención hidráulica, lo que les permite adaptarse a variaciones en la carga orgánica e hidráulica, favorecer la acumulación de precipitados y minimizar la formación de espumas. Son especialmente adecuadas en zonas con amplia disponibilidad de terreno, ya que requieren grandes extensiones, pero a cambio ofrecen costos operativos y de mantenimiento significativamente más bajos en comparación con otros métodos convencionales. Dependiendo de las necesidades del tratamiento, estos sistemas pueden emplearse en etapas primarias, secundarias o incluso terciarias. De igual manera nos muestra que Los métodos de filtración basados en membranas, como la ósmosis inversa, la nanofiltración y la ultrafiltración, han ganado relevancia en el tratamiento de efluentes debido a su alta eficiencia en la eliminación de diversos contaminantes, incluidos metales pesados y sólidos disueltos. Dentro de estas tecnologías, los biorreactores de membrana (MBR) integran procesos biológicos con sistemas avanzados de ultrafiltración, optimizando la separación de partículas y componentes líquidos. Su aplicación es especialmente efectiva en la reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la eliminación de amoníaco en lixiviados que



han sido sometidos a un tratamiento previo o que presentan un alto grado de envejecimiento, sin embargo, la operación de estos sistemas exige un mantenimiento constante, incluyendo la reposición periódica de membranas, además de requerir un manejo técnico especializado. Un desafío común en su uso es la obstrucción de las membranas por acumulación de residuos, lo que puede hacer necesario un pretratamiento adicional, elevando los costos de operación.

2. BIODIGESTIÓN

La biodigestión es una tecnología muy empleada que consiste en la descomposición de materia orgánica por acción de microorganismos en ausencia de oxígeno, dentro de un contenedor denominado biodigestor, el cual puede variar en tamaño y forma. (Chaves et al., 2024). Se desarrolla mediante un proceso biológico natural en el que la materia orgánica compleja se descompone en compuestos más simples por una comunidad de microorganismos en un entorno con poca luz y pobre en oxígeno. (Przybyla et al., 2024).

Se tiene la digestión anaerobia, la cual es un conjunto de procesos biológicos interrelacionados en los que la materia orgánica, ya sea en forma de carbohidratos, proteínas, lípidos o compuestos más complejos, se convierte en metano, dióxido de carbono y biomasa microbiana en ausencia de oxígeno. Este mecanismo se aplica tanto al tratamiento de residuos sólidos y aguas residuales como a la generación de biogás (Donoso-Bravo et al., 2011). En este proceso la materia orgánica en ausencia de oxígeno es convertida en metano y dióxido de carbono a través de varias fases sucesivas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Para que este proceso sea eficiente, se requiere una interacción coordinada



entre dichas etapas y los microorganismos involucrados, lo cual puede implicar la necesidad de condiciones ambientales específicas para cada fase. (Bedin et al., 2024).

En la etapa de la hidrólisis los compuestos como carbohidratos, lípidos y proteínas son descompuestos en monómeros mediante exoenzimas y estructuras bacterianas como el celulosoma. Luego, en la etapa de acidogénesis, estos monómeros se transforman en ácidos grasos de cadena corta como acético, propiónico, butírico, isobutírico, además de alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono. Posteriormente en la etapa de acetogénesis, dichos compuestos se convierten en acetato, hidrógeno y CO₂. Finalmente, en la metanogénesis, los metanógenos transforman estos intermediarios en metano y dióxido de carbono.

Aproximadamente un tercio del metano generado proviene de la reducción del CO₂ mediante hidrógeno. (Rajendran et al., 2012)

2.2 Biogás

Cuando un residuo orgánico se descompone en ausencia de oxígeno, se genera una mezcla de gases principalmente metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) se conoce como biogás. Este biogás representa una alternativa energética sostenible, ya que puede obtenerse a partir de diversas fuentes como vertederos, digestión anaerobia de residuos orgánicos, lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, estiércol de origen animal o incluso cultivos energéticos. La composición del biogás crudo varía en función de la naturaleza del sustrato utilizado y del diseño del proceso de producción, lo que influye directamente en su calidad y en las posibles aplicaciones energéticas. (Rafiee et al., 2021).



La generación de biogás a partir de residuos orgánicos presenta múltiples beneficios frente a otras alternativas como la incineración, la producción de bioaceite y otros biocombustibles (bioetanol, biobutanol, biohidrógeno), así como la generación de electricidad o biodiésel. Entre sus principales ventajas destacan un mayor aprovechamiento energético, un impacto ambiental reducido y menores costos de inversión en infraestructura. El biogás, que se convierte en una mezcla inflamable cuando la proporción de biometano supera el 40 %, y se obtiene mediante un proceso biológico compuesto por las cuatro etapas presentadas en la biodigestión anaerobia (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis), llevado a cabo por un inóculo microbiano que agrupa distintos tipos de bacterias especializadas. (Parsae et al., 2019).

2.3 DQO

La DQO es un parámetro que indica la cantidad de oxígeno requerida para oxidar las sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en una muestra que son susceptibles de oxidación. Su medición se realiza a través de un proceso de oxidación intensa en un medio altamente ácido y los resultados obtenidos reflejan el nivel de oxidación alcanzado por los contaminantes, permitiendo así evaluar su grado de degradación. (Gálvez et al, 2001)

Para medir la concentración de DQO se determina mediante la ecuación:

$$\%COD \text{ removal} = \frac{COD_{in} - COD_{out}}{COD_{in}} \times 100 \quad \text{eq (1)}$$

Donde DOS_{in} es la concentración de DQO antes del tratamiento y COD_{out} es la concentración después del proceso (Kuokkanen et.,2015).



3. ACIDO POLILÁCTICO (PLA)

El ácido poli láctico es un polímero biodegradable derivado de recursos renovable como el almidón de maíz, la caña de azúcar y otros materiales ricos en carbohidratos. La producción y uso de este material han tenido un crecimiento exponencial, ya que es un material clasificado dentro de lo versátil y sostenible, representando un 32,2% del rendimiento mundial de bioplásticos en 2020. Por ende se suele usar en áreas como la medicina y generalmente en la industria.

Propiedades del PLA

Biocompatibilidad: El PLA es químicamente inerte y no genera toxicidad, lo que lo hace ideal para aplicaciones médicas y microbiológicas. Es compatible con microorganismos, permitiendo su uso como soporte para la formación de biopelículas y sustancias poliméricas extracelulares (EPS)

Propiedades mecánicas:

Tiene buenas propiedades mecánicas comparándolo con otros materiales termoplásticos estándar, o sea una resistencia mecánica adecuada, con características como porosidad, textura y área de superficie ajustables, también posee baja resistencia al impacto.

- Dureza, resistencia al impacto, rigidez y elasticidad.
- Buena resistencia a la torsión.
- Es permanente.



- De color claro brillante.
- Es inodoro.
- Se obtiene de los recursos renovables y naturales.

Propiedades de impresión

- Temperatura de extrusión 200°C.
- Potencia del ventilador 100%.
- Ningún olor al imprimir.
- Adhesión entre capas media.

Biodegradabilidad:

Bajo condiciones específicas, el PLA se descompone en ácido láctico, integrándose en ciclos biológicos sin generar residuos persistentes. La degradación del ácido poliláctico (PLA) tiende a ser más lenta cuando su estructura interna es más ordenada (cristalinidad alta), contiene una gran cantidad de ácido láctico en forma L, y su peso molecular es mayor. En este proceso, los microorganismos como hongos y bacterias se adhieren a la superficie del PLA y liberan sustancias que rompen el material en fragmentos más pequeños. (Sandoval, 2016).

La capacidad de los microorganismos para adherirse al PLA depende de características como la forma de la superficie del material (su textura y porosidad) y qué tan accesibles son las cadenas internas del polímero. Una vez que los microorganismos están



adheridos, liberan enzimas especiales que atacan ciertos puntos débiles del PLA, descomponiéndolo en partes muy pequeñas que pueden ser digeridas fácilmente.

Propiedades físicas y mecánicas

- Entre este tipo de propiedades podemos mencionar:
- Densidad 1,24 g/cm³.
- Resistencia a la tracción de 3309 MPa.
- El límite elástico es de 55 MPa.
- Resistencia a la compresión 66 MPa.
- Resistencia a la flexión de 485 MPa.
- Temperatura de deformación 55°C.
- Muy baja resistencia a la humedad.
- Elongación 3%.

4. ANTECEDENTES

- En el estudio llamado “Anaerobic mono and co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and landfill leachate at industrial scale: Impact of volatile organic loading rate on reaction kinetics, biogas yield and microbial diversity. Science of the Total Environment” por TAS et al. (2020) evaluó el desempeño de una planta semi-industrial de digestión anaerobia para tratar la



fracción orgánica de residuos sólidos municipales y lixiviado de relleno sanitario, tanto por separado como en combinación. Se utilizaron tres reactores tipo gas-lift, operados durante 47 semanas a distintas cargas orgánicas. Los resultados mostraron que la co-digestión fue más eficiente, con una reducción de sólidos volátiles del 47% y una producción diaria de 60.8 m³ de biogás. En comparación, la monodigestión generaron 73.8 m³/día y 42 m³/día de biogás, respectivamente, con reducciones de VS entre 42–46%. Los análisis microbianos revelaron comunidades dominadas por bacterias como Proteobacteria y arqueas metanogénicas como Methanosaeta y Methanoculleus. Estas favorecieron una producción estable de biogás incluso a altas cargas. Además, el modelo de Stover-Kincannon confirmó una buena relación entre la carga orgánica y la eficiencia del proceso.

- El estudio realizado por Franca et al. (2020) llamado “The role of dry anaerobic digestion in the treatment of the organic fraction of municipal solid waste: A systematic review. Biomass and Bioenergy” presenta una revisión sistemática de la digestión anaerobia seca (DAD) como una alternativa eficiente y sostenible para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), especialmente en contextos donde predominan residuos con alto contenido de sólidos y baja separación en origen. La DAD se destaca frente a métodos convencionales como el vertido, la incineración o el compostaje, ya que permite la producción de biogás (principalmente metano), reduce las emisiones de



gases de efecto invernadero, y genera un digestato rico en nutrientes que puede ser utilizado como fertilizante. Abarcó 206 estudios, de los cuales 30 cumplieron con los criterios de inclusión, y evidenció que la mayoría de las investigaciones se han desarrollado en Europa y Asia, donde también se ha implementado a escala industrial el uso de tecnologías como Dranco, Kompogas, Valorga, Laran y Bekon. Estas tecnologías suelen operar bajo condiciones mesofílicas, en sistemas de alimentación continua y con reactores como CSTR (continuously stirred tank reactor) o LBR (leach bed reactor). Se identificaron factores clave que influyen en el rendimiento del proceso, como la concentración de sólidos totales, la proporción sustrato/inóculo, el tiempo de retención, el pH y la tasa de carga orgánica. También se destaca el papel de los co-sustratos (estiércol, lodos, residuos de alimentos) para mejorar el equilibrio nutricional y la estabilidad del proceso.

ANÁLISIS DE RESTRICCIONES

El proyecto de análisis de la formación de una biopelícula en el tratamiento de lixiviados por medio de digestión anaerobia enfrenta diversas restricciones que pueden llegar a afectar su viabilidad. A continuación, se detallarán las limitaciones en áreas económicas, sociales, técnicas y ambientales, las cuales se deben considerar para garantizar el éxito del proyecto.



Económico:

El proyecto de análisis de biopelícula a partir de lixiviados mediante la biodigestión anaerobia enfrenta desafíos significativos en términos económicos y de competitividad en el mercado. Los altos costos que incluye la materia prima con equipos más estandarizados, esto incluye el valor de los reactores anaerobios, sistemas de monitoreo y control, esto puede incrementar el valor de la inversión y limitar la estabilidad del proceso. Además, para la implementación de un buen digestor con avanzadas tecnologías, requiere inversiones significativas de infraestructura adecuada.

En el mercado los biodigestores anaerobios para un relleno sanitario, sería de gran avance, pero para ello tendría que haber un cambio de la infraestructura para sacarle provecho, esto puede llegar a limitar el proceso ya que si el proceso implementación es más costoso que el beneficio final.

Social:

La percepción pública de nuevas tecnologías podría significar desconfianza, la comunidad local podría tener preocupaciones por los malos olores, ruidos, riesgos asociados con enfermedades, por patógenos o contaminantes, la percepción de la comunidad está asociada con el modelo actual, costumbre de su vida al lado de un relleno sanitario, lo cual puede limitar la aceptación del producto. La relación con la comunidad es



crucial, por ello la implementación de estas nuevas tecnologías deben de ser gestionadas con total transparencia y responsabilidad, haciendo que la comunidad perciba directamente los beneficios. (Jurado, 2024)

Técnico:

El proyecto, enfrenta desafíos técnicos que comprometen su eficiencia y estabilidad. Su proceso requiere de varios equipos como lo son los reactores anaerobios donde principalmente se escogería un reactor soportado para que ayude a que se fijen más los microorganismos, por otro lado, el material soporte que está hecho a base de polipropileno y poliestireno expandido es un material de difícil manejo.

Además, la composición del material de la biopelícula es crucial para su efectividad, ya que en la adherencia de los microorganismos pueden llegar a haber variaciones en las propiedades de la biopelícula y las condiciones del proceso como lo son el pH, temperatura y nutrientes. Esto puede resultar en diferencias significativas en el resultado final. (Aridi et al, 2024)

En comparación con unos reactores más avanzados y mejor estandarizados se podría afirmar que el monitoreo del proceso sería menos demandante, aunque el brinco tecnológico que supero las aplicaciones tradicionales (fosa séptica, tanque Imhoff, laguna anaerobia) fue este en principio como el concepto de biopelícula que se retienen por sedimentación (Botera et al., 1987)

Ambiental:



El proyecto, enfrenta desafíos ambientales debido a que los lixiviados tiene características físicas y químicas que generan varios problemas como lo es; de salubridad y deterioro del medio ambiente. Estos efectos son provocados principalmente por contaminación atmosférica, en aguas subterráneas y superficiales, proliferación de plagas, animales carroñeros y focos infecciosos. (Martínez et al.,2013)

Debido a que los lixiviados se generan también por la humedad de los sólidos orgánicos, existen reglamentaciones de orden internacional, distrital y nacional. Que han permitido establecer diferentes lineamientos normativos para el buen manejo de los residuos, lo que soporta mejores prácticas para el aprovechamiento, tratamiento y caracterización de los diferentes residuos que llegan a los rellenos sanitarios.

- Política para la gestión ambiental de los residuos sólidos

1997.Ministerio del medio ambiente: Esta política define los principios de la gestión integral de todos los tipos de residuos. Establece el máximo aprovechamiento y mínimo de residuos con destino al relleno sanitario. Define las categorías de residuos aprovechable, ordinarios, para minimizar riesgos en los seres humanos y el medio ambiente, que ocasionan los residuos de todo orden y minimizar la generación y la disposición final.

- Política ambiental para la gestión integral de residuos o desechos peligrosos 2005.Ministerio del medio ambiente: Directrices para la gestión de residuos peligrosos.



- Ley 1333 de Julio de 2009: Establece el nuevo régimen sancionatorio ambiental
 - Se incorporan los principios ambientales y constitucionales
 - El daño ambiental se califica como infracción ambiental
 - Define la función de las medidas preventivas y regula el régimen de las sanciones
- Decreto 4741 de 2005. Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial: Se reglamenta la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos.
- Decreto 2028/2010. Ministerio de Ambiente vivienda y desarrollo territorial: Licencias ambientales. En el artículo 9, numeral 10 que establece las competencias de las corporaciones autónomas regionales, la construcción y operación de instalaciones cuyo objeto sea el almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento, recuperación y/o disposición final de residuos o desechos peligrosos.
- Resolución 1552 de 2005. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial: Se adoptan manuales para evaluación de estudios ambientales y seguimiento ambiental de proyectos y se toman otras determinaciones.
- Resolución 601 de 2006. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial: Se establece la norma de calidad de aire o nivel de inmisión, para el territorio nacional en condiciones de referencia (olores).



METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN

La elección de lixiviados en el proyecto se debe a que es uno de los subproductos más comunes producidos por la actividad humana, donde a lo largo del tiempo se evidencia que la mala gestión de los lixiviados puede tener consecuencias perjudiciales en todas las



matrices ambientales como la percolación en suelos, la afectación de cuerpos de agua y finalmente la producción de GEI.

Los costos para la prevención de contaminación por residuos sólidos y lixiviados segun la ONU en su programa medio ambiental en 2020 el coste directo mundial para la gestión de residuos sólidos se estimó en 252.000 millones de dólares, teniendo en cuenta otros factores indirectos como la contaminación, la insalubridad y el cambio climático que se dan por los malos manejos de residuos el precio aumenta a 361.000 millones de dólares y si no se realizan acciones para detener estas prácticas irresponsables se estima que en el año 2050 el coste anual anteriormente planteado podría aumentar a 640.300 millones de dólares. La correcta gestión de residuos sólidos y lixiviados puede llevar a un ahorro en el 2050 de 270.200 millones de dólares y si se elaboran prácticas de recirculación de estos subproductos como lixiviados promoviendo la economía circular podría tener un beneficio de 108.500 millones de dólares al año.

A lo largo del tiempo la tecnología ha permitido el tratamiento de los lixiviados por diversas metodologías, donde vale la pena seguir innovando en ellas y analizar alternativas de mejora que pueden ser viables no solo para ciertas poblaciones si no que el impacto social de estas sea globalmente aplicable para todo tipo de comunidad, por esta razón se selecciona el método de digestión anaerobia a partir de biodigestores, este es un método que ha sido aplicado en muchos casos de estudio, sin embargo tiene una gran amplitud de estudio mejora e innovaciones como la aplicación de materiales de PLA y a partir de ahí



realizar el análisis de su eficiencia y mayor acumulación de biopelículas y/o microorganismos todo con el fin de mejorar el proceso de tratamiento hacia los lixiviados.

El tratamiento de lixiviados por medio de biodigestores por encima de otros tratamientos se debe a los pocos estudios con base al análisis de su efectividad a pesar de que puede generar oportunidades de energía renovable y la mitigación de diferentes impactos negativos en las matrices ambientales. Su facilidad de aplicación en laboratorios para su prolongado estudio comparado con otros tratamientos de lixiviados donde su análisis a partir de laboratorios y evaluación realizada por estudiantes puede llegar a ser más compleja.

La aplicación de PLA es fundamental para el desarrollo del proyecto este se caracteriza por convertirse en uno de los bioplásticos más consumidos del mundo, con una producción de 394.800 toneladas en 2020 representando un 32,2% del rendimiento mundial total de bioplástico, alrededor de los diferentes estudios se evidencia un análisis destacable donde la aplicación de esto materiales puede contribuir a la producción de metano. (Lu Bei et al, 2022).

Esta es una alternativa esperanzadora debido a que la mayor parte de la contaminación atmosférica se debe a la quema de combustibles fósiles, donde en los últimos años se ha evidenciado un aumento de los precios de los combustibles fósiles y a los impuestos de las fuentes de energía. Encontrar una alternativa a estas fuentes de energía tan contaminantes es fundamental para la sustentabilidad del planeta, ya que brinda más



prosperidad económica y una mejor calidad de vida. El biogás entra hacer un sustituto de la leña y del estiércol de ganado que puede llegar a satisfacer las necesidades energéticas de la población rural. Una de sus ventajas es la producción de biogás se puede llevar a cabo en diferentes metodologías desde reactores muy pequeños hasta biodigestores de gran tamaño de 10.000 como los que utilizan en ciudades grandes y desarrolladas. Las inversiones de biogás han aumentado en grandes países como China, Nepal, Bangladesh, son países que han aumentado sus inversiones en infraestructura de biogás muy rápidamente debido a su eficiencia tanto económica como ambiental, se plantean estrategias como en china donde se plantean diferentes estrategias como implementar en el 2020 en 80 millones de hogares tengan digestores de biogás que puedan atender a 300 millones de personas.

El ácido poli láctico (PLA) tiene como propiedad fundamental la biocompatibilidad, debido a que se usa en muchas aplicaciones médicas, ya que se necesita que este no interfiera en funciones biológicas normales, por ende, es un material compatible con microorganismos, ya que no genera toxicidad que pueda afectar su crecimiento o metabolismo, también es un soporte que puede contribuir a la formación de sustancias poliméricas extracelulares (EPS) que contiene componentes como polisacáridos, proteínas, lípidos y ácidos nucleicos, los cuales ayudan con la adhesión microbiana, esto es un mecanismo de supervivencia para microorganismos que se pueden encontrar en condiciones hostiles y su crecimiento se dificulta. (Abera et al, 2024)



El PLA tiene propiedades mecánicas como porosidad, textura y área de superficie ajustables, lo cual cumple con las características que influyen en la formación de biopelículas. Su estructura puede modificarse para optimizar la humectabilidad y la conductividad, promoviendo un entorno ideal para el desarrollo microbiano.

Además, se da una viabilidad metodológica más amplia frente a otras alternativas expuestas, debido a que el laboratorio de la Universidad EAN cumple con las licencias, equipos y personal para realizar este tipo de análisis frente al tratamiento de lixiviados, ya que la aplicación de otras metodologías implicaba el estudio de sustancias tóxicas donde se tenía el desconocimiento de licencias para su uso y el equipo requerido.

Otro factor fundamental para la elección de este análisis son las oportunidades de innovación y aprendizaje que esto brinda a la comunidad estudiantil, adicionalmente el uso de nuevas tecnología y alianzas que contribuyen al desarrollo del proyecto.

METODOLOGÍA DE DESARROLLO

1. Recolección de datos

Inicialmente, y con el propósito de determinar la eficiencia de la fijación de biopelículas en el soporte de PLA (Ácido poliláctico), se realizó una prueba experimental en el laboratorio de la universidad EAN donde se registraron, los pesajes, volúmenes correspondientes en cada etapa. Posteriormente estas muestras se escogieron de forma



aleatoria, donde cada una de ellas se sometieron a un análisis fisicoquímico. Este proceso permitió análisis la fijación de a biopelícula.

2. Obtención de la materia prima

1.1 Lixiviados

Para la recolección de muestra de lixiviados se hizo por medio de un piloto casero con todos los residuos que salieran de dos casas la fecha de recolección fue el 29 de febrero de los residuos y su tiempo de almacenamiento fueron 54 días, el suficiente para que se produjera la descomposición de esta materia dando como resultados lixiviados.

Figura 1. *Recolección de muestras de lixiviado*



1.2 Estiércol

La muestra de estiércol de vaca se encontraba en el Laboratorio de la Universidad EAN

1.3 Acai

La muestra de la Biomasa (acai) se hizo por medio de un secado de 24 horas a una temperatura de 45°C, de esta forma fue posible eliminar la humedad que resiste en la muestra,



posteriormente a esto se llevó a un proceso de trituración para reducir el tamaño de partícula para evitar inconvenientes técnicos a la hora de manejar esta biomasa.

Figura 2. *Trituración de muestra de Acai*



Figura 3. *Maceración de muestra de Acai*



Utilizando el molino parte del material de laboratorio, se pulverizan las cascaras de ACAI, obteniendo un polvo de textura mixta. Para obtener una textura homogénea, se pasan las cascaras por una torre de tres tamices, con una apertura donde el tamaño de partícula estuviera entre los 60 μm y 63 μm , garantizando que solo se utilizara material que cumpliera el tamaño de la normativa.

Figura 4. *Maceración de muestra de Acai*



3. Prueba experimental. Fijación de la Biopelícula

Como parte de la metodología, se realizan prácticas de laboratorio, donde se utilizaron una serie de técnicas combinadas de carácter fisicoquímico, con el propósito de generar metano y también el monitoreo del biodigestor para medir la efectividad de añadir una biopelícula.

Con el fin de analizar el resultado final, se realizan varias sesiones de laboratorio para los diferentes resultados.

Tabla 1. *Distribución de pruebas experimentales*

PROCEDIMIENTO	PRUEBAS
Sesión de laboratorio N°1 (Clasificación de muestra aleatoria y montaje de biodigestores)	1: Lixiviado
	2: Lixiviado + Biomasa+ Biopelícula (PLA)
	3: Lixiviado + Biomasa (ACAI)



	4: Estiércol + Biopelícula + Biomasa
	5: Lixiviado + Biopelícula
	6: Estiércol + Biopelícula
	7: Estiércol
Sesión de laboratorio N°2 (Análisis de DQO equipo HANNA y PH)	1: Lixiviado
	2: Lixiviado +Biomasa + Biopelícula (PLA)
	3: Lixiviado + Biomasa (ACAI)
	4: Estiércol + Biopelícula + Biomasa
	5: Lixiviado + Biopelícula
	6: Estiércol + Biopelícula
	7: Estiércol
Sesión de laboratorio N°3 (Pruebas de humedad)	1: Estiércol
	2: Biomasa (ACAI)
	3: Lixiviado
Sesión de laboratorio N°4 (Pruebas de ceniza)	1: Estiércol
	2: Biomasa (ACAI)
	3: Lixiviado
Sesión de Laboratorio (Pruebas microbiológicas)	1: Estiércol
	2: Biomasa (ACAI)
	3: Lixiviado
	4: Lixiviado + Biopelícula (PLA)
	5:Estiércol+Biomasa (ACAI)+ Biopelícula
	6: Lixiviado + Biopelícula
	7: Estiércol + Biopelícula
Sesión de laboratorio N° 6-7-8-9-10-11-12-13-14. (Medición del volumen desplazado, equivalente al volumen de metano producido)	1: Lixiviado
	2: Lixiviado + Biomasa+ Biopelícula (PLA)
	3: Lixiviado + Biomasa (ACAI)
	4: Estiércol + Biopelícula + Biomasa
	5: Lixiviado + Biopelícula
	6: Estiércol + Biopelícula
	7: Estiércol



Figura 4. *Montaje de los biodigestores*



Durante un periodo de 20 días en un equipo de incubación llamado (INCUBADORA JSR)

4. Caracterización de los Biodigestores

4.1 Protocolo para la determinación de DQO

La medición del DQO (Demanda química de oxígeno) sirve para medir la materia orgánica de la muestra. Mediante el equipo de HANNA(Reagent Set) del material de



laboratorio se llevó a cabo este proceso experimental. El método colorimetría se basa en la oxidación de la materia orgánica por medio de un oxidante fuerte; dicromato de potasio como oxidante, este es una sal de cromo hexavalente de color naranja brillante. Entre el 95% y el 100% de material orgánico se puede oxidar con dicromato.

En esta parte se añadió 0.2 ml de cada una de las 7 muestras a los tubos ya estipulados por el equipo HANNA.

Figura 5. *Equipo HANNA Reagent Set*



Posteriormente las muestras se someten a un proceso digestión mediante el equipo HANNA (HI 839800 COD REACTOR), con una cantidad ya determina de oxidante, ácido sulfúrico y calor a 150°C por 2 horas. Una vez se oxida la sustancia, esta se convierte a una forma trivalente de cromo que es un color verde opaco.

Figura 6. *Equipo HANNA HI 839800*



Figura 7. Calentamiento Equipo HANNA HI 839800 2 horas después.



Finalmente, cada una de las 7 muestras fueron sometidas a medición por espectrofotometría, mediante el equipo de laboratorio HANNA HI 83099, en donde se



seleccionó la medición de la Demanda química de oxígeno, posteriormente a esto el equipo arroja los resultados.

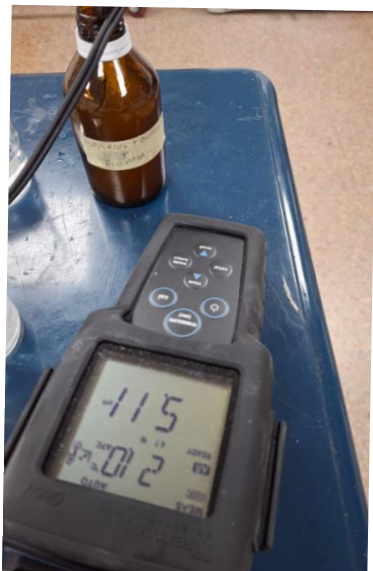
Figura 8. *Medición equipo HANNA HI83099*



4.2 Protocolo para la determinación de pH (Potencial de hidrogeno)

Mediante el equipo THERMO SCIENTIFIC ORION, parte del material de laboratorio, se determinó el pH inicial y final de cada una de las 7 muestras.

Figura 9. *Determinación del pH*



4.3 Protocolo para la determinación de humedad (Lixiviados, Biomasa, Estiércol, PLA)

La determinación del contenido de humedad de las muestras se realizó mediante la metodología (ASTM D3302), utilizando el horno a temperatura constante para su posterior secado.

Materiales y equipos:

- Tamiz para homogenizar las muestras
- Pinzas de laboratorio
- Crisoles
- Balanza analítica con precisión mínima de 0.001g
- Horno a una temperatura regulable (precalentado 105°C)

El procedimiento para la determinación de humedad de las 6 (duplicado) muestras se llevó a cabo siguiendo los siguientes pasos. En primer lugar, se registraron los pesos de los



crisoles utilizando una balanza analítica para asegurar la precisión de cada una de las mediciones.

En segundo lugar, al estar las muestras tamizadas, se colocó una cantidad adecuada de muestra al crisol y se registró peso inicial (muestra a + crisol). Posteriormente los crisoles con las muestras fueron introducidos a un horno precalentado a 105°C, donde permanecieron durante 24 horas de este modo se asegura la eliminación de la humedad de las muestras. Finalmente, tras el tiempo de secado, los crisoles fueron retirados y se colocaron en un desecador para su enfriamiento hasta alcanzar la temperatura ambiente. Una vez frías las muestras estas volvieron a ser pesadas en la balanza analítica y se registró el peso final. Este proceso de pesaje se repitió tres veces por muestra y los valores obtenidos fueron sometidos promediados para garantizar la exactitud y fiabilidad de los resultados. El contenido de humedad se calculó mediante a la siguiente ecuación.

Ecuación 1

$$\text{Humedad}\% = \frac{\text{muestra húmeda} - \text{muestra seca}}{\text{muestra seca}} \times 100$$

Figura 10. *Pesaje Crisol y muestra*

Figura 11. *Muestras por duplicado*

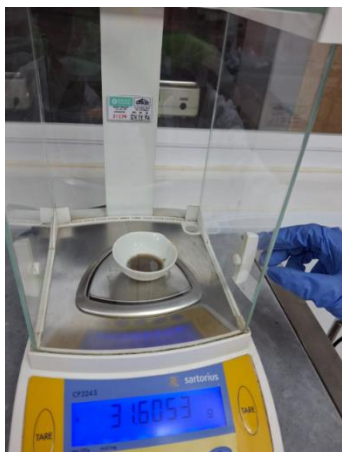


Figura 12. Muestras introducidas al horno



Figura 13. Muestras después de 24 h



4.4 Protocolo para la determinación de cenizas (Lixiviados, Biomasa, Estiércol, PLA)

Para determinar el contenido de cenizas de cada una de las muestras secas y pulverizadas mediante un proceso de combustión controlado.

Materiales y equipos:

- Crisoles
- Mufla con control de temperatura programables.
- Balanza analítica con precisión mínima de 0.001g



- Desecados con agente desecante

El procedimiento para la determinación de cenizas se comenzó pesando los crisoles vacíos y registrando su peso, luego se colocó la cantidad representativa de muestra al crisol, y se volvió a pesar (crisol + muestra), registrando el peso total. Posteriormente se procedió a precalentar la mufla según las especificaciones del protocolo, y luego se introdujeron los crisoles con las muestras, sometiéndose a un esquema de calentamiento en 3 etapas:

- Se elevó la temperatura de ambiente a 105°C a una velocidad de 10°C/ min durante 12 min.
- Se incrementó de 105°C a 250°C a la misma velocidad por 30 min.
- Finalmente, se aumentó a 575°C a una velocidad de 20°C/min durante 180 minutos.

Después de la calcinación, se permitió que las muestras se enfriaran en la mufla hasta alcanzar los 105°C, luego se retirando los crisoles donde se depositaron en un desecador hasta llegar a una temperatura ambiente. Finalmente se registró el peso final de los crisoles con las cenizas y se calculó el % de cenizas con la siguiente ecuación.

Ecuación 2

$$\text{Cenizas \%} = \frac{\text{crisol cenizas} - \text{crisol vacío}}{\text{muestra seca}} \times 100$$

4.5 Protocolo Sólidos totales y volátiles



La determinación de los Sólidos totales y volátiles, se ha por medio de los datos obtenidos de los análisis de humedad y cenizas. Para determinar los sólidos totales, se registrará el peso del crisol vacío y el peso del crisol con la muestra seca, aplicando la fórmula correspondiente para obtener el porcentaje de sólidos totales en relación con el peso inicial de la muestra, según la ecuación 3. Este procedimiento se repite para cada muestra evaluada. Posteriormente, se calcularán los sólidos volátiles restando el porcentaje de cenizas previamente determinado del porcentaje de sólidos totales, conforme a la ecuación 4. Estos cálculos permitirán analizar la composición de las muestras y comprender de manera más detallada su contenido de sólidos totales y volátiles, información clave para caracterizar sus propiedades.

Ecuación 3

$$\text{Sólidos Totales\%} = \frac{\text{crisol muestra seca} - \text{crisol vacío}}{\text{Crisol con muestra inicial} - \text{crisol vacío}} \times 100$$

Ecuación 4

$$\text{Sólidos volátiles\%} = \frac{\text{crisol con muestra seca} - \text{crisol con cenizas}}{\text{crisol con muestra inicial} - \text{crisol vacío}}$$

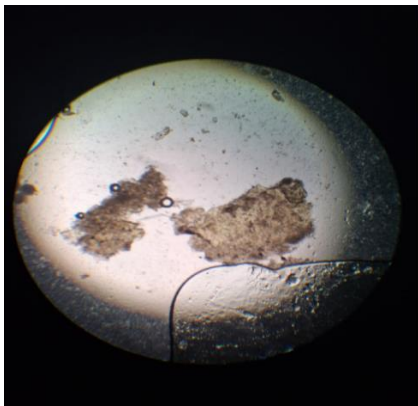
4.6 Protocolo caracterización microbiológica

La determinación microbiológica se hizo de manera sencilla, se colocaron las muestras que contenían la biopelícula en un microscopio del laboratorio de la universidad llamado (LABOMED), mediante este se hizo la visualización del raspado de las muestras, en las siguientes imágenes se muestran los resultados:



- Lixiviado + Acai + Biopelícula

Figura 14. Imagen desde el microscopio



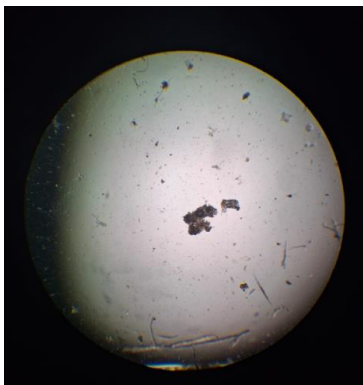
- Estiércol + Biopelícula

Figura 15. Imagen desde el microscopio



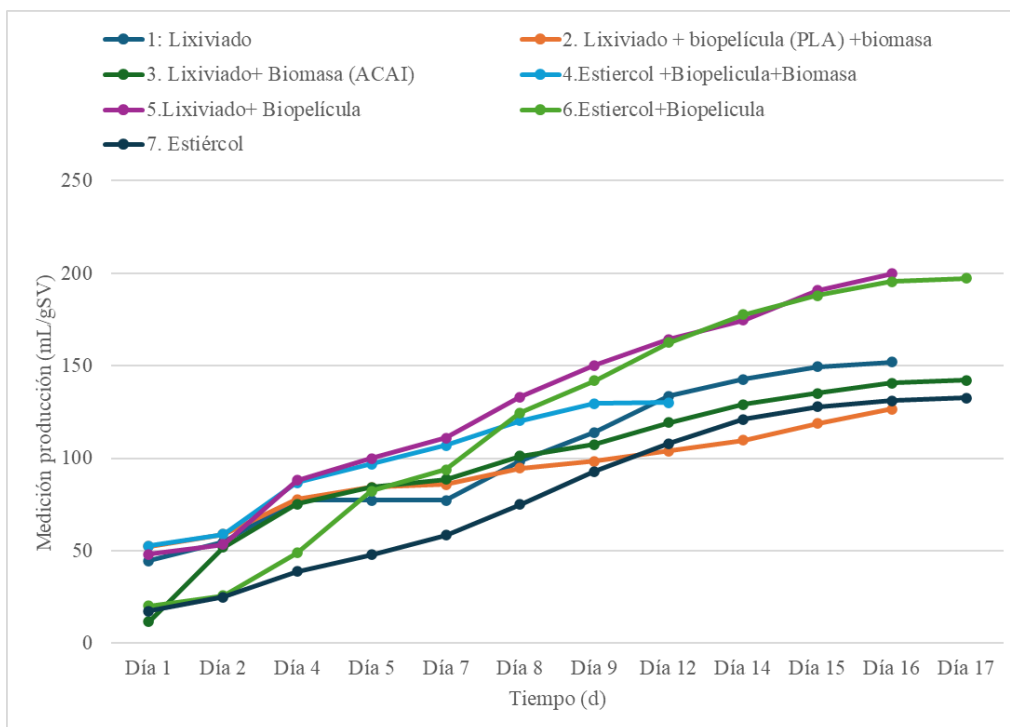
- Estiércol + biopelícula

Figura 16. Imagen desde el microscopio



RESULTADOS

Figura 17. Curvas de biodegradabilidad por muestra



A partir de la curva de biodegradabilidad se observa que las muestras con mayor producción de biogás (expresada en mL/gSV) corresponden a aquellas que contienen el inóculo (lixiviado o estiércol) combinado con la biopelícula de PLA. En particular, las muestras 5 (Lixiviado + Biopelícula) y 6 (Estiércol + Biopelícula) muestran una tendencia sostenida y creciente, alcanzando los valores más altos de producción hacia el día 17. Esto sugiere que la incorporación de la biopelícula favorece significativamente el proceso de biodigestión anaerobia, posiblemente al ofrecer una superficie adecuada para la adherencia y proliferación de los microorganismos responsables del proceso.

En contraste, las muestras que incluyen biomasa junto con la biopelícula (como las muestras 2 y 3) presentan una menor eficiencia en la producción de biogás. Una posible explicación es



que la biomasa pudo haber obstruido los poros de la biopelícula, dificultando la colonización microbiana o limitando el intercambio de nutrientes y gases esenciales para el proceso de digestión.

En cuanto a la muestra 4 (Estiércol + Biopelícula + Biomasa), se presentó un inconveniente técnico relacionado con el recipiente, lo que impidió la recolección de datos de forma continua y completa. No obstante, los valores registrados en los primeros días sugieren un comportamiento favorable.

En cuanto a la medición de los sólidos totales (SST) y sólidos volátiles (SV) estos dieron:

TABLA 2. Valor de medición de sólidos totales y volátiles

Sólidos totales (SST)	Valor	Sólidos volátiles (SV)	Valor
Lixiviado	11,08%	Lixiviado	12,26%
Estiércol	15,54%	Estiércol	13,54%
Acai	72,64%	Acai	71,33%

El lixiviado presenta un contenido de sólidos totales (SST) de 11,08% y de sólidos volátiles (SV) de 12,26%, lo que da una relación SV/SST cercana a 1,1. Esto indica que casi en su totalidad de sus sólidos corresponde a materia orgánica biodegradable, lo cual es altamente favorable para la producción de metano en el proceso de biodigestión anaerobia. En el caso del estiércol, se observa un mayor contenido de SST (15,54%) y un SV de 13,54%, lo



que implica que aproximadamente el 87% de sus sólidos son volátiles. El 13% restante corresponde a sólidos fijos o inorgánicos, posiblemente compuestos por minerales, arena u otras partículas no biodegradables, que podrían acumularse en el biodigestor, disminuyendo su capacidad útil y requiriendo mantenimiento regular para evitar la sedimentación. Por otro lado, el acaí destaca por sus elevados niveles de SST (72,64%) y SV (71,33%), con una relación SV/SST de aproximadamente 0,98, lo que indica que es un sustrato mayoritariamente orgánico y altamente biodegradable. Esta alta proporción de sólidos volátiles lo convierte en un material especialmente atractivo para la producción de biogás, debido a su gran potencial metanogénico.

En relación con las mediciones de pH se logró observar que:

TABLA 3. Medición inicial y final de pH

MUESTRA	Medición inicial pH	Medición final pH
1: Lixiviado	5.09	5.44
2. Lixiviado + biopelícula (PLA) +biomasa	5.08	4.27
3. Lixiviado+ Biomasa (ACAI)	5.08	6.85
4.Estiercol +Biopelicula+Biomasa	5.11	10.50
5.Lixiviado+ Biopelícula	5.11	6.42
6.Estiercol+Biopelicula	7.42	7.45
7. Estiércol	7.47	7.28

Se debe tener en cuenta que, durante el proceso de digestión anaerobia, el pH suele disminuir inicialmente debido a los mecanismos de acidificación, posteriormente este sube levemente y se estabiliza para evitar condiciones que perjudiquen la actividad microbiana. En



estas mediciones se observaron distintos comportamientos entre las muestras. Las muestras 1 (Lixiviado) y 5 (Lixiviado + Biopelícula) mostraron un aumento moderado del pH, indicando un sistema relativamente equilibrado. La muestra 2 (Lixiviado + Biopelícula + Biomasa), en cambio, presentó una fuerte disminución del pH hasta 4.27, lo que puede haber afectado negativamente la actividad microbiana, esto probablemente se deba a que la biomasa obstruyó los poros de la biopelícula, dificultando la estabilización del sistema. En contraste, la muestra 3 (Lixiviado + Biomasa) mostró un aumento significativo del pH hasta 6.85, acercándose a un rango óptimo para la metanogénesis. La muestra 4 (Estiércol + Biopelícula + Biomasa) alcanzó un pH final de 10.50, un valor anormalmente alto que puede atribuirse a que solo se tuvo una producción de 12 días y no completó el ciclo de estabilización como las demás. Por otro lado, las muestras 6 (Estiércol + Biopelícula) y 7 (Estiércol) mantuvieron pH cercanos a la neutralidad (7.45 y 7.28 respectivamente), lo cual es ideal para el desarrollo de bacterias metanogénicas y sugiere una adecuada estabilidad del sistema.

Con respecto a las mediciones realizadas del DQO se obtuvo que:

TABLA 4. Medición inicial y final de DQO

MUESTRA	Medición inicial DQO	Medición final DQO
1: Lixiviado	1039 mg/L	296 mg/L
2. Lixiviado + biopelícula (PLA) +biomasa	1079 mg/L	464 mg/L
3. Lixiviado+ Biomasa (ACAI)	1056 mg/L	653 mg/L
4.Estiercol +Biopelicula+Biomasa	1054 mg/L	294 mg/L



5.Lixiviado+ Biopelícula	1057 mg/L	159 mg/L
6.Estiercol+Biopelicula	1076 mg/L	726 mg/L
7. Estiércol	1072 mg/L	274 mg/L

Las muestras 1 (Lixiviado), 4 (Estiércol + Biopelícula + Biomasa), 5 (Lixiviado + Biopelícula) y 7 (Estiércol) presentan reducciones notables en sus niveles de DQO, especialmente la muestra 5, que pasó de 1057 mg/L a 159 mg/L, lo que representa la mayor eficiencia de remoción entre todas las muestras. Este comportamiento nos da a entender que la combinación del lixiviado con la biopelícula favorece significativamente la degradación de la materia orgánica.

Así mismo, la muestra 4 también muestra una buena remoción de DQO, con una disminución de 1054 mg/L a 294 mg/L. Aunque este resultado es positivo, debe considerarse que esta muestra solo se evaluó durante 12 días, por lo que existe la posibilidad de que, con el ciclo completo, la eficiencia hubiera sido aún mayor. La muestra 7 (Estiércol) también tuvo una disminución considerable (de 1072 mg/L a 274 mg/L), lo cual evidencia que el estiércol por sí solo es un sustrato con buena capacidad de degradación en condiciones anaerobias.

Por otro lado, las muestras 2 (Lixiviado + Biopelícula + Biomasa), 3 (Lixiviado + Biomasa) y 6 (Estiércol + Biopelícula) presentaron menores porcentajes de reducción de DQO. Esto puede estar relacionado con la presencia de biomasa, que posiblemente obstruyó los poros de la biopelícula o dificultó la acción de los microorganismos al generar una carga orgánica más difícil de degradar.



ANÁLISIS DE COSTOS

El análisis de costos consiste en la implementación del biodigestor con la capacidad de suministrar biogás para una familia e 7 personas es decir 600L para esto se determina una inflación en la cual se realizó una simulación con la inflación de los últimos 4 años de inflación en Colombia de 2022 a 2025, el desarrollo de los cálculos se realizan a partir de una producción de un mes 0,2L a escala doméstica y 600 L escala comercial, para poder iniciar con un proyecto como el de los biodigestores se debe contar con un espacio y/o el alquiler de un laboratorio, mano de obra, el seguimiento y mantenimiento de los biodigestores, los EPP, además del transporte para trasladar y recolectar la materia prima.

TABLA 5. Costos materia prima

	Cantidad para un biodigestor escala domestica 0,2L	Precio Kg/l	Precio und 200 ml	Precio escala comercial 600.000 ml
Estiercol	7	3000	21	\$ 63.000
PLA	4,05	80000	324	\$ 972.000



Lixiviado	7	10000	70	\$ 210.000
Acai	3,5	12000	42	\$ 126.000
Agua destilada	200	2900	580	\$ 1.740.000
Manguera	1	1000	1000	\$ 3.000.000
TOTAL	-		2037	\$ 6.111.000

Para los costos de materia prima se tuvieron en cuenta los precios de su transporte ya que los precios de los lixiviados y el estiércol se dieron por su transporte, los otros precios se obtuvieron a partir de las marcas que tiene cada producto el laboratorio de la Universidad EAN.

TABLA 6. Costos mensuales de mano de obra por profesión

Profesión	Personal	Sueldo
Ingeniero Químico	1	\$ 3.833.968
Ingeniero ambiental	1	\$ 3.879.969
Administrador	1	\$ 2.500.000
Ventas	1	\$ 1.423.500
TOTAL	4	\$ 11.637.437

Los datos para cada profesión se obtuvieron de la página de ministerio de trabajo (Ocupacol) donde se realizó el promedio de los salarios de cada profesional.

TABLA 7. Costos fijos

Costos fijos	Costo
Mano de obra	\$ 11.637.437
Alquiler de laboratorio	\$ 2.500.000
Transporte	\$ 329.400
Mantenimiento	\$ 200.000



EPPS	\$ 100.000
TOTAL	\$ 14.766.837

TABLA 8. Costos fijos y variables con proyección anual

		ESTADO DE RESULTADOS				
		2025	2026	2027	2028	2029
VENTAS	\$	103.802.967,0	\$ 110.112.079,1	\$ 117.774.578,9	\$ 127.016.046,3	\$ 138.124.429,6
COSTO VENTAS	\$	55.499.000,0	\$ 57.730.459,7	\$ 60.641.012,0	\$ 64.317.658,7	\$ 68.874.565,8
UTILIDAD BRUTA	\$	48.303.967,0	\$ 52.381.619,4	\$ 57.133.566,9	\$ 62.698.387,6	\$ 69.249.863,8
GASTOS ADITIVOS Y VTAS	\$	11.683.438,0	\$ 12.290.976,8	\$ 12.930.107,6	\$ 13.602.473,2	\$ 14.309.801,8
GASTOS FIJOS DEL PERIODO	\$	3.500.000,0	\$ 3.682.000,0	\$ 3.873.464,0	\$ 4.074.884,1	\$ 4.286.778,1
OTROS GASTOS	\$	100.000,0	\$ 50.000,0	\$ 50.000,0	\$ 50.000,0	\$ 50.000,0
DEPRECIACIÓN	\$	2.568.080,0	\$ 2.568.080,0	\$ 2.568.080,0	\$ 2.568.080,0	\$ 2.568.080,0
UTILIDAD OPERATIVA	\$	30.452.449,0	\$ 33.790.562,6	\$ 37.711.915,4	\$ 42.402.950,4	\$ 48.035.204,0
GASTOS FINANCIEROS	\$	2.123.893,7	\$ 1.776.005,2	\$ 1.393.327,9	\$ 972.382,9	\$ 509.343,4
UTILIDAD ANTES DE IMPTOS	\$	28.328.555,4	\$ 32.014.557,4	\$ 36.318.587,4	\$ 41.430.567,4	\$ 47.525.860,5
IMPUESTOS	\$	9.631.708,8	\$ 10.884.949,5	\$ 12.348.319,7	\$ 14.086.392,9	\$ 16.158.792,6
UTILIDAD NETA	\$	18.696.846,5	\$ 21.129.607,9	\$ 23.970.267,7	\$ 27.344.174,5	\$ 31.367.067,9



CONCLUSIONES

La remoción de carga orgánica en lixiviado a partir de biodigestores se ve favorecida, debido a la gran variabilidad de muestreo que se utilizó ya que se implementaron más factores para aumentar la producción de los biodigestores como Acai y estiércol, adicionalmente el nivel de maduración de los lixiviados era alto por ende contaba con una carga orgánica adecuada, esto sumado al constante monitoreo que se realizó diario de los biodigestores se logra evidenciar un avance significativo en la producción de metano. Gracias a esto se logra evidenciar la eficiencia que tienen los biodigestores para la remoción de la carga orgánica de los lixiviados y como estos también contribuyen a la generación de energías renovables.

Por otra parte, la implementación de PLA como soporte para aumentar la eficiencia del proceso se evidencia que el porcentaje de efectividad es alto, debido a que los biodigestores que más tuvieron producción cuentan con la presencia de la biopelícula, es por esto que es correcto afirmar que el PLA se adapta como un potenciador para aumentar la productividad de metano en los biodigestores debido a su composición la cual es inerte y no genera toxicidad, además de ser compatible con microorganismos lo que lo hace ideal para este tipo de procesos.



Finalmente se concluye que la biodigestión anaerobia es un proceso eficiente e innovador para el tratamiento de lixiviados el cual conserva un equilibrio entre su eficiencia y costo, esta alternativa debido a sus características se convierte en una opción viable y en una respuesta llena de oportunidades para países en vía de desarrollo como Colombia y así poder dejar de lado procesos tradicionales que pueden afectar el medio ambiente y la salud pública, además de la importancia de seguir en línea de investigación y mejora para estos procesos que ya se han implementado pero que cuentan con muchos espacios de crecimiento, evolución y aprendizaje como lo fue en este caso la implementación de PLA para lograr una mayor producción. La importancia de promover este tipo de procesos es no solo focalizar la mitigación del ambiente sino también construir formas de compensación que conlleven a un desarrollo sostenible.



REFERENCIAS

- Aridi, R., & Yehya, A. (2024, septiembre). Anaerobic biodigesters heating sources: Analysis and recommendations. En *ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/bdbiblioteca.universidadean.edu.co/science/article/pii/S136403212400426X>
- Avance Jurídico Casa Editorial Ltda. (s. f.). *Leyes desde 1992 - Vigencia expresa y control de constitucionalidad [LEY_1418_2010]*. Avance Jurídico Casa Editorial Ltda., Senado de la República de Colombia. http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1418_2010.html#1
- Botera, R., & Preston, T. (1987). *BIODIGESTOR DE BAJO COSTO PARA LA PRODUCCION DE COMBUSTIBLE Y FERTILIZANTE A PARTIR DE EXCRETAS*. <https://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/04-biodigestores.pdf>
- César Augusto Villamizar Sierra, Bryan Javier Uribe Reyes (2022) “Análisis de las Propiedades Mecánicas en Piezas de PLA Fabricadas por Manufactura Aditiva con Fibras Orgánicas de Refuerzo” <https://noesis.uis.edu.co/bitstreams/99a3f2ca-b0ac-4508-b9b4-502851fc09d4/download>



- Chaves, G. T., Teles, F., Balbo, A. R., dos Reis, C. A., & de Oliveira Florentino, H. (2024). Mathematical modelling of biodigestion in an Indian biodigester and its stability analysis via Lyapunov technique. *Renewable Energy*, 226, 120431.
- Cornejo, C & Machado, G. (2017). Diseño y construcción de un reactor BATCH prototipo para la obtención de compost con residuos orgánicos generados en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Recuperado de: <http://dspace.esepoch.edu.ec/bitstream/123456789/6943/1/96T00392.pdf>
- Curado, E. (2024, 22 octubre). Generación de Electricidad con Biogás: Proceso y Beneficios Explicados. *Revista Renace*. <https://renace.net/actualidad/como-se-genera-electricidad-con-el-biogas/>
- Datos impactantes: Toneladas de basura diaria en Bogotá - Bogota. (2024, 2 mayo). *My Blog*. <https://bogota.tecnoguias.net/cuantas-toneladas-de-basura-se-producen-al-dia-en-bogota/>
- De Ciencias Exactas Físicas y Naturales, A. C. (2010, 16 septiembre). *LOS RELLENOS SANITARIOS EN LATINOAMÉRICA: CASO COLOMBIANO*. <https://repositorio.accefyn.org.co/handle/001/2721>
- Donoso-Bravo, A., Mailier, J., Martin, C., Rodríguez, J., Aceves-Lara, C. A., & Vande Wouwer, A. (2011). Model selection, identification and validation in anaerobic digestion: a review. *Water research*, 45(17), 5347-5364.
- Gálvez, J. B., Rodríguez, S. M., Gasca, C. A. E., Bandala, E. R., Gelover, S., & Leal, T. (2001). Purificación de aguas por fotocátalisis heterogénea: estado del arte. Purificación de aguas por fotocátalisis heterogénea: estado da arte. La Plata.



- Gladys, J. H., & María, Z. M. L. (2008). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/45>
- Guevara, A., Guanoluiza, L., & de la Torre, E. (2014). Diseño de sistemas de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario. *Revista Politécnica*, 34(1). https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/154
- Institutodelaguaes. (2024, 19 enero). *Carga Orgánica en Aguas Residuales: Un análisis detallado de su impacto y manejo* | Instituto del Agua. Instituto del Agua. <https://institutodelagua.es/aguas-residuales/carga-organica-en-aguas-residualesaguas-residuales/>
- Jayanth, T. A. S., Mamindlapelli, N. K., Begum, S., Arelli, V., Juntupally, S., Ahuja, S., ... & Anupoju, G. R. (2020). Anaerobic mono and co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and landfill leachate at industrial scale: Impact of volatile organic loading rate on reaction kinetics, biogas yield and microbial diversity. *Science of the Total Environment*, 748, 142462.
- Jurado, R. A. J. R. A. (2024). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. www.academia.edu. https://www.academia.edu/105785256/Digesti%C3%B3n_anaer%C3%B3bica_mecanismos_biotecnol%C3%B3gicos_en_el_tratamiento_de_aguas_residuales_y_su_aplicaci%C3%B3n_en_la_industria_alimentaria



- Kuokkanen, V., Kuokkanen, T., Rämö, J., Lassi, U., & Roininen, J. (2015). Removal of phosphate from wastewaters for further utilization using electrocoagulation with hybrid electrodes–Techno-economic studies. *Journal of Water Process Engineering*, 8, e50-e57
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.11.008>.
- Lu, B., Jiang, C., Chen, Z., Li, A., Wang, W., Zhang, S., & Luo, G. (2022). Fate of polylactic acid microplastics during anaerobic digestion of kitchen waste: Insights on property changes, released dissolved organic matters, and biofilm formation. *Science of The Total Environment*, 834, 155108. <http://www.sciencedirect.com/bdbiblioteca.universidadean.edu.co/science/article/pii/S004896972202201X>
- Luna, M. D. (2008). Sistemas de tratamientos para lixiviados generados en rellenos sanitarios. UNIVERSIDAD DE SUCRE FACULTAD DE INGENIERÍA.
- Martínez Sepúlveda, José Alejandro And Montoya Gómez, Nancy Johana. Análisis preliminar de la viabilidad de obtención de bioetanol a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. En: PRODUCCIÓN + LIMPIA. vol. 2, no. 8, p. 72-84
- Méndez Novelo, R., CastilloBorges, E., SauriRiancho, M. R., QuintalFranco, C., GiacománVallejos, G., & JiménezMejía, B. (2004). Tratamiento fisicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario. *Ingeniería*, 8(2), 155-163.
- Mohammad, E., Turcios, A., & Weichgrebe, D. (15d. C.). Removal of inert COD and trace metals from stabilized landfill leachate by granular activated carbon (GAC) adsorption. *ScienceDirect*.
- Parsaee, M., Kiani, M. K. D., & Karimi, K. (2019). A review of biogas production from sugarcane vinasse. *Biomass and bioenergy*, 122, 117-125.



Política para la gestión de residuos. (1997, agosto). Ministerio de Ambiente. Recuperado 1 de agosto de 1997, de

https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Sistema_Gestion_de_Calidad/Procesos%20y%20procedimientos%20Vigente/Normatividad_Gnl/Politica%20para%20la%20Gestion%20Integral%20de%20Residuos%20Solidos%20-%201997.pdf

Przybyla, G., Nadaleti, W. C., Gomes, J. P., dos Santos, M. C., & de Souza, E. G. (2024).

Transforming by-products into renewable energy: Biochemical analysis of anaerobic digestion of biowastes for bioreactors optimization supporting the low-carbon agroindustry.

International Journal of Hydrogen Energy, 94, 912-921.

Rafiee, A., Khalilpour, K. R., Prest, J., & Skryabin, I. (2021). Biogas as an energy vector.

Biomass and Bioenergy, 144, 105935.

Salazar, V. (2018). SOBREPOBLACIÓN Y CONSUMISMO, PRINCIPALES RETOS PARA

UN DESARROLLO REGIONAL SUSTENTABLE. X.

https://ru.iiec.unam.mx/4272/1/1-Vol2_Parte1_Eje3_Cap6-032-Salazar.pdf

Sandoval Rojas, M. E. (2016). Tratamiento de vinazas provenientes de etanol en un reactor de

lecho fluidizado inverso (Doctoral dissertation, Caminos).

UNEP (28 de febrero, 2024) “Global Waste Management Outlook 2024”

<https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>

World Health Organization: WHO. (2020, 9 diciembre). La OMS revela las principales causas

de muerte y discapacidad en el mundo: 2000-2019. OMS.



<https://www.who.int/es/news/item/09-12-2020-who-reveals-leading-causes-of-death-and-disability-worldwide-2000-2019>