

# DINÁMICA AMBIENTAL

COMPENDIO TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN

ISSN: 2590-6704



UNIVERSIDAD LIBRE

2021

No.5

ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD  
RESOLUCIÓN No. 015865 (25-08-2021) VIGENCIA 4 AÑOS

Especialización en Gestión Ambiental

# DINÁMICA AMBIENTAL

COMPENDIO DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN



## UNIVERSIDAD LIBRE

ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD

RESOLUCIÓN No. 015865 (25-08-2021) VIGENCIA 4 AÑOS

**DIRECTIVOS UNIVERSIDAD LIBRE**

ISSN: 2590-6704

Presidente Nacional: Dr. Jorge O. Alarcón Niño  
 Vicepresidente: Dr. Jorge Gaviria Liévano  
 Rector Nacional: Dr. Edgar E. Sandoval Romero  
 Censor Nacional: Dr. Ricardo Zopó Méndez  
 Presidente – Rector Seccional: Dra. Erika Patricia Rincón Remolina  
 Decano Facultad de Derecho, Ciencias Políticas y sociales: Dra. Isabel Cristina Ramírez Núñez  
 Decana Facultad de Ciencias Económicas, Administrativas y Contables: Dra. Martha Ximena Rivera Franco  
 Coordinador Programa de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias: Ing. Mg. Hugo Ballesteros Monsalve  
 Coordinador de Ciencias de la Educación: Ing. MSc. Johan Builes Gonzáles  
 Coordinador Programa Administración de Empresas: Dr. Edis Mauricio Sanmiguel Jaimes  
 Directora de Planeación: Dra. Eliana Ortiz Medina  
 Director de Investigación Seccional: Ing. Mg. Haimar Ariel Vega Serrano

**GRUPO EDITORIAL****Decano****Facultad de Ingeniería y  
Ciencias Agropecuarias**

Hugo Ballesteros Monsalve

Ingeniero de Minas. Magister en Desarrollo Sostenible

**Coordinador**

Lilian Astrith Chaparro Granados  
 Coordinadora Especialización en Gestión  
 Ambiental

Ingeniera Forestal. Fundación Universitaria De García Rovira Norte y  
 Gutiérrez. Especialista en Ingeniería Ambiental. Universidad Pontificie  
 Bolivariana. Especialista en Gerencia del ambiente. Universidad Pontificie  
 Bolivariana. Magister en Agroforestry systems. Centro Agronómico

Fotografía Portada y Contraportada:

Nombre: "Cascada Majavita"  
 Autor: Chirley Daly Gordillo Benavides  
 Lugar: Santander

Diagramación:

Ingeniera Ambiental, Universidad Libre

Universidad Libre Seccional Socorro  
 Campus Universitario Majavita  
 Dirección de Investigación  
[publicaciones.soc@unilibre.edu.co](mailto:publicaciones.soc@unilibre.edu.co)  
 Teléfono 6077276500 Extensión 3839

ISSN: 2590-6704  
 Revista No. 5 Diciembre de 2021  
 Fecha de Publicación:

Los autores son responsables directos de las ideas, juicios, opiniones y/o enfoques expuestos en la Revista Dinámica Ambiental.

Puede ser reproducida totalmente o parcialmente citando la fuente.

Revista Dinámica Ambiental Investigación	Socorro, Santander Colombia	Año 5. No.5	Diciembre de 2021	ISSN: 2590 - 6704	Págs 70
--	-----------------------------	-------------	-------------------	-------------------	---------

## CONTENIDO

ISSN: 2590-6704

- |   |   |    |
|---|---|----|
| 1 | Alternativas ambientales para el aprovechamiento de residuos sólidos y líquidos agroindustriales provenientes de la palma de aceite ( <i>Elaeis guineensis</i> )        | 7  |
|   | <b>Marcela Michela Montoya Centeno</b>  |    |
| 2 | Impactos ambientales generados en la producción de café pergamino seco  | 26 |
|   | <b>Viviana Ardila Rivero</b>  |    |
| 3 | Alternativa de tratamiento de aguas residuales para hoteles campestres en el departamento de Santander  | 40 |
|   | <b>Carlos Jeffrey Bastos Daza</b>   |    |
| 4 | Análisis de producción de biogás a partir de desechos de café vs desechos porcinos en la finca “villa juliana” en la vereda el moral del municipio de Páramo, Santander | 53 |
|   | <b>Paula Daniela Chacón Ballesteros</b><br><b>Alexis Rodríguez Cañón</b>  |    |

## PRÓLOGO

*Autor: Ing. MSc. Lilian Astrith Chaparro Granados*

ISSN: 2590-6704

Esta revista constituye la quinta edición recopila y expone monografías de revisión, realizados por los estudiantes de la Especialización en Gestión Ambiental de los años 2022-2023.

Los trabajos seleccionados abordan diferentes temáticas teniendo como base fuentes de información secundaria, tales como artículos, tesis, revistas, entre otras; las cuales verifican su autenticidad y validez para proceder a analizar la información que allí reposa.

Los artículos incluyen diferentes temáticas ambientales, que representan las Alternativas ambientales para el aprovechamiento de residuos sólidos y líquidos agroindustriales provenientes de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*); los Impactos ambientales generados en la producción de café pergamino seco; adicionalmente se presentan Alternativas de tratamiento para las aguas residuales generadas en los hoteles campestres de Santander y finalmente un estudio de caso, el cual analiza la producción de biogás a partir de desechos porcinos y subproductos del café, en una unidad productiva del municipio del Páramo, Santander. Todas estas temáticas reflejan el enfoque multidisciplinar que tienen los estudiantes de la Especialización en Gestión Ambiental; además de un interés particular por la aplicación de la normatividad ambiental vigente, en los diferentes sectores y actividades productivas que impactan directamente el medio ambiente y salud humana.

Se destaca que, aunque los estudiantes de la especialización tienen distintos perfiles profesionales aplican la gestión ambiental y tienen elementos que les permiten abordar y aplicar los conocimientos adquiridos para dar solución a las problemáticas ambientales, además adquieren nuevas herramientas para ser competitivos en el medio laboral.

La Revista Dinámica Ambiental, tiene como finalidad, dar a conocer diferentes temas de interés ambiental, reflejando el trabajo realizado por los estudiantes, permite al lector tener un contexto actualizado en el área de la gestión ambiental integral y se constituye como un insumo para futuros trabajos de investigación y/o complementación de revisiones bibliográficas.

# Alternativas ambientales para el aprovechamiento de residuos sólidos y líquidos agroindustriales provenientes de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*)

**Marcela Michela Montoya Centeno**, Ingeniera Agroindustrial. Instituto de la Paz.

Tutora: Ing. MSc. Lilian Astrith Chaparro Granados. Coordinadora Esp. Gestión Ambiental. Universidad Libre Socorro

ISSN: 2590-6704

## RESUMEN

Actualmente, Colombia, es considerado como el primer productor de palma de aceite (*Elaeis guineensis*) en América Latina, su cultivo y producción se ha expandido considerablemente en el territorio, a su vez la actividad agroindustrial ha tenido relevancia a nivel ambiental, en donde la generación de residuos sólidos y líquidos ha sido evidente; puesto que el 72% del producto cosechado se convierte en residuo. Por lo tanto, en este artículo de revisión, se presenta una visión general de la cantidad, tipo de residuo y alternativas de tratamiento actuales para el aprovechamiento de la biomasa residual producida por el sector palmero; en donde se pueden obtener diferentes productos de valor agregado, como bioenergía (biogás, biodiesel, bioaceite, bioetanol); biocompuestos (carbón activado, filtros, biopelletes), biofertilizantes, bioactivos y compuestos como la celulosa entre otros; que contribuyan a la producción sostenible, con cero residuos.

**Palabras Clave:** Biomasa residual, bioeconomía circular, palma de aceite, residuos agroindustriales, tratamiento, subproductos, utilización.

## Abstract

Currently, Colombia is considered the first producer of oil palm (*Elaeis guineensis*) in Latin America, its cultivation and production have expanded considerably in the territory, in turn, the agro-industrial activity has had relevance at the environmental level, where the generation of solid and liquid waste has been evident; since 72% of the harvested product becomes waste. Therefore, in this review article, an overview of the amount, type of waste, and current treatment alternatives for the use of residual biomass produced by the palm sector are presented; where different value-added products can be obtained, such as bioenergy (biogas, biodiesel, bio-oil, bioethanol); biocomposites (activated carbon, filters, pellets), biofertilizers, bioactive and compounds such as cellulose, among others; that contribute to sustainable production, with zero waste.

**Keywords:** Residual biomass, circular bioeconomy, oil palm, agro-industrial waste, treatment, by-products, utilization.

## Introducción

A nivel mundial la producción primaria (agropecuaria, forestal y piscícola) ha evolucionado a sistemas más complejos que implican su transformación y la producción de materias primas, conformando la agroindustria (Baruah, 2011), la cual se constituye como un

negocio derivado de la producción agrícola, forestal o pecuaria, en donde interactúan diferentes actores (personas, empresas) y procesos (procesamiento, producción, fabricación, transporte y venta) (Borsellino, 2019), formando una cadena productiva, generadora de beneficios a nivel del sistema económico, como: aumento de productividad agrícola, empleo e incorporación de innovadoras y modernas tecnologías, permitiendo de esta manera la dinamización de la economía (López Macías & Castrillón, 2009). Sin embargo, la agroindustria, origina diferentes impactos a nivel ambiental, relacionados con la pérdida y destrucción de ecosistemas, especies nativas, cambios en la estructura del suelo, contaminación del aire y de cuerpos de agua a causa de productos químicos y procesos de eutrofización (Trevors & Saier, 2010), además de generar importantes cantidades y volúmenes de residuos sólidos agrícolas de carácter orgánico (Andreichenko y otros, 2021).

En este sentido en Colombia se estima que la producción de residuos animales y vegetales derivados de las actividades económicas corresponde a 7'190.182 toneladas, de las cuales el 78,8% fueron empleadas en la cogeneración de energía y sometidas a otros aprovechamientos (DANE, 2022). Por su parte, los cultivos agroindustriales (café, palma de aceite, caña para azúcar, caña para panela, cacao, soya, algodón, caucho, tabaco, fique, entre otros) cuya producción asciende a las 42'208.363 toneladas (DANE, 2020) y en donde su procesamiento a nivel industrial genera una considerable cantidad de los denominados residuos agroindustriales (Cantão Freitas, y otros, 2021) que incluyen fibras, tallos, hojas, cáscaras, pulpa, semillas oleaginosas, legumbres, rastrojos de fruta, bagazo, etc., los cuales pueden reincorporarse al ecosistema, puesto que son recursos renovables y además sirven como materia prima para la fabricación de productos de valor agregado (Mohanty y otros, 2022) y representan un tercio de la producción

agrícola mundial (equivalentes a 1300 millones de toneladas de alimentos para el consumo humano) que no son aprovechados (Yafetto y otros, 2023), adicionalmente otros estudios sugieren la pérdida de alimentos en 361 millones de toneladas al año, en el aspecto relacionado con la industria de producción y comercialización de productos alimenticios (PNUMA, 2021).

En el caso particular de la palma de aceite, se estima que para el año 2021 a nivel nacional el área destinada para su cultivo fue de 595.722 hectáreas, siendo el cuarto mayor productor en el mundo y el primero en América, en donde el 84% de éstas se encontraba en etapa productiva y de las cuales se obtuvieron 7'882.225 toneladas de racimos de fruta fresca (RFF) equivalentes a 1'747.377 y 312.512 toneladas de aceite de palma crudo y palmiste (almendra de palma), respectivamente (Fedepalma, 2022), lo que refleja su alta expansión y el crecimiento de la demanda de sus productos principalmente de aceite de palma, que constituye el 40% de la producción de aceite vegetal en el mundo y es utilizado a nivel industrial en la elaboración de diferentes artículos alimenticios, cosméticos, detergentes, biocombustibles, farmacéuticos entre otros (Anima Antwi y otros, 2023), por lo tanto análogamente un crecimiento y expansión del cultivo de palma de aceite, tiene un impacto directo sobre la generación de residuos sólidos tanto agrícolas como agroindustriales (Coral Medina y otros, 2019).

En contextualización a los residuos agroindustriales provenientes de la palma de aceite, es importante mencionar los procesos durante su cultivo, producción y transformación a nivel industrial, generadores de desechos o residuos. En este sentido, la palma de aceite es una planta oleaginosa (proporciona los mayores rendimientos en producción de aceite), perenne, alcanza una altura aproximada de 30 metros y una vida productiva de 25 años, produce racimos

de frutos compactos de un peso variante entre los 10 y 40 kg (Fedepalma, 2007); en su etapa de desarrollo se remueve biomasa correspondiente a las hojas secas, en la etapa de aprovechamiento y procesamiento surgen residuos como las hojas que se retiran cuando se extraen los racimos de la palma (en campo), racimos de frutas vacíos, fibra de mesocarpio, cáscaras de palmiste (en la extractora) y al final de su vida productiva residuos como tallos y hojas que son talados para realizar la renovación del cultivo (Dirkes, y otros, 2021 ), según se muestra en la figura 1. Adicionalmente, se considera que la actividad agroindustrial de la extracción de palma de aceite, del 100% de los RFF sólo el 24% se convierte en producto, mientras el 76 % se desperdicia en el proceso o sale como residuo (Poku, 2002), otro estudio sugiere que sólo se utiliza el 9% y el 91% es expulsado o es considerado como desecho (Saval, 2012), en este sentido (Romero Peláez y otros, 2022) plantean que sólo del 10% corresponden a aceites y en un 90% a residuos agroindustriales de la extracción de palma de aceite, conformado por líquidos residuales y material lignocelulósico de importancia ambiental, puesto que éstos compuestos pueden ser utilizados en la elaboración de bioproductos.

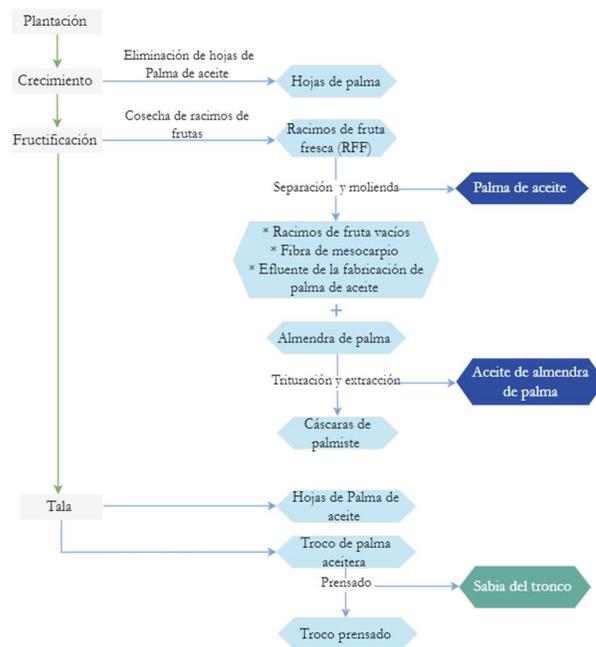


Figura 1. Residuos sólidos generados por la palma de aceite durante su vida productiva, según (Dirkes, y otros, 2021 ). Nota: Los cuadros azules y verde claro representan la biomasa o residuos generados, los azules oscuros son los productos obtenidos a nivel industrial.

La composición de los residuos agroindustriales consta principalmente de tres compuestos conformados por celulosa, lignina y hemicelulosa, interconectados entre sí y que forman una estructura protectora frente a la destrucción celular por hongos o bacterias (Mussatto y otros, 2012), éstos a su vez son compuestos poliméricos, la celulosa es el biopolímero más abundante, se encuentra en las paredes celulares vegetales, su composición corresponde a glucosa exclusivamente; además de ser una de las materias más utilizadas en la fabricación de papel (Isogai, 2014); la hemicelulosa por su parte, es un biopolímero de homo o hetero-polisacáridos formadores de la matriz que soporta las fibras de celulosa, cuyas propiedades le confieren alta solubilidad, asimismo es un componente natural

biodegradable renovable (Ribeiro Martins y otros, 2022); finalmente la lignina es el segundo

biopolímero más abundante en el materia vegetal (Feofilova & Mysyakina, 2016), “es amorfo de unidades heterogéneas de fenilpropano que sirve como aglutinante, proporcionando fuerza y rigidez a las paredes celulares vegetales” (Uraki & koda , 2014) y puede ser utilizada como aditivo de materiales poliméricos, así como también convertida en productos químicos finos (Erfani Jazi y otros, 2019). De manera general, la celulosa, hemicelulosa y lignina componen la biomasa lignocelulósica, la cual posee numerosas aplicaciones como la producción de biocombustibles, productos bioquímicos, biomateriales (tanto de lignina como de celulosa) y materiales de carbono (carbón activado. nanomateriales) (Okolie y otros, 2021), reflejando así la utilidad de las propiedades de los subproductos o residuos agroindustriales y de los desechos de biomasa vegetal.

En relación a la biomasa residual de la actividad agroindustrial de la palma de aceite, se cuantifica que por cada hectárea de plantación anualmente, se genera aproximadamente 21,63 toneladas de residuos, de éstos el 85% consta de residuos sólidos distribuidos porcentualmente de la siguiente manera, un 50,30% corresponde a de hojas de palma de aceite (OPF), el 20,43% a racimos de fruta vacíos (EFB), un 12,53% a fibra de palma prensada (PPF), el 11,65% a troncos de palma (OPT) y un 5,09% a cáscaras de palmiste (OPS); y el 15% restante a residuos líquidos (13,8% al efluente de la fabricación de aceite de palma- POME y un 1.2% a destilado de ácidos grasos de palma- PFAD), los cuales producen efectos negativos a nivel ambiental sino son tratados adecuadamente (Ofori Boateng & Lee , 2013). En cuanto a su composición en la tabla 1, se muestran el contenido porcentual de algunas sustancias presentes en los residuos agroindustriales de la palma de aceite (OPAW)

**Tabla 1.**

*Composición porcentual lignocelulósica de algunos residuos agroindustriales de la palma de aceite.*

Fibras	Extractivo (%)	Holocelulosa (%)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Ceniza (%)	Referencias
Racimos de Fruta Vacíos (EFB)	2-4	68-86	43 - 65	17 - 33	13 -37	1- 6	(Dungani y otros, 2018)
Hojas de palma de aceite (OPF)	2-5	80 - 83	40 - 50	34 - 38	20 - 21	2 - 3	(Olatunji y otros, 2021)
Troncos de palma aceitera (OPT)	4 - 7	42 – 45	29 - 37	12 -17	18 -23	2 - 3	(Dungani y otros, 2018)
Cáscaras de palma de aceite (OPS)	0,9 - 2	40 – 47	27 - 35	15 - 19	48 - 55	1 - 4	

**Nota:** Según (Dungani y otros, 2018), (Olatunji y otros, 2021).

Según, lo expuesto anteriormente, tanto la producción como la transformación de la palma de aceite, produce un volumen considerable de residuos, constituyéndose como un problema de alta relevancia y para el cual, se han propuesto diferentes alternativas de tratamiento u aprovechamiento, siendo el compostaje y la digestión anaerobia las técnicas más utilizadas (Yahya y otros, 2022). Sin embargo, éstos residuos poseen diferentes características y componentes valiosos que, mediante el uso de tecnologías adecuadas e innovadoras, pueden proporcionar recursos o materias primas útiles para la producción de energía, biofertilizantes y diferentes productos usados en la industria (Handique y otros, 2023), además de biocombustibles, biogás, bioproductos (Samanta y otros, 2023) (Vandamme, 2009), y bioactivos con utilidad funcional para la fabricación de productos alimenticios (Tan y otros, 2007), contribuyendo de esta manera a disminuir la contaminación y al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible.

Por lo tanto, el presente documento consta de un artículo de revisión, en el cual se plantean los siguientes objetivos.

## OBJETIVOS

### Objetivo General

- Analizar las alternativas ambientales para el aprovechamiento de residuos sólidos agroindustriales provenientes de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*).

### Objetivos específicos

- Determinar y cuantificar las áreas de producción de palma de aceite (*Elaeis guineensis*) a nivel nacional.
- Determinar la cantidad de residuos agroindustriales de palma de aceite generados a nivel nacional.

- Indicar los diferentes tipos de tratamiento y/o aprovechamiento de los residuos sólidos y líquidos agroindustriales derivados de la palma de aceite.

## MÉTODOS

Para la elaboración del presente documento, se realizó una revisión bibliográfica, en diferentes bases de datos especializadas y confiables como Science Direct, Scopus, Scielo, Dialnet, Wiley, PNAS, entre otras; así como también, se recopiló información sobre el cultivo y producción de palma de aceite en Colombia, obtenida principalmente de base de datos oficiales de las entidades Fedepalma, Cenipalma y Agronet. A partir de informes de producción se calcularon los residuos generados, por esta actividad tanto en la industria como en campo, los resultados se encuentran contemplados en la siguiente sección.

## RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del análisis de información secundaria, en torno a la producción de palma de aceite, residuos e impactos generados, así como también un análisis del aprovechamiento de los mismos.

### Áreas de producción de aceite de palma en Colombia.

En relación a áreas de producción de palma de aceite, se realizó la espacialización y cuantificación de los municipios que cuentan con cultivo, siendo 156 distribuidos porcentualmente de la siguiente manera el 47% en la zona norte, 28% en la zona centro, 23% en zona oriental y el 2% en la zona suroccidental, como se muestra en la figura 2; las cuales abarcan un total 592,722 hectáreas donde 499,364 ha están en producción y las zonas oriental y centro son las áreas de mayor

producción con 216,672 y 161,402 ha respectivamente. En lo que respecta a plantas de beneficio existen 70, donde la mayor proporción se encuentran en la zona oriental y la central.

Adicionalmente, se realizó una comparación de información de las áreas sembradas con cultivo de palma, a partir de la información presente en el catálogo estadístico de Agronet y la contenida en el anuario estadístico de Fedepalma,

encontrándose diferencias significativas en el área de producción total como se observa en la figura 3; en este sentido para el año 2021 en Agronet, se reportan 636,781.3 ha mientras en Fedepalma 499,364 ha, en donde la diferencia comprende 137,417.3 ha, es decir una diferencia porcentual del 28%; indicando de esta manera que pueden existir áreas que no se encuentran inventariadas o registradas en Fedepalma.

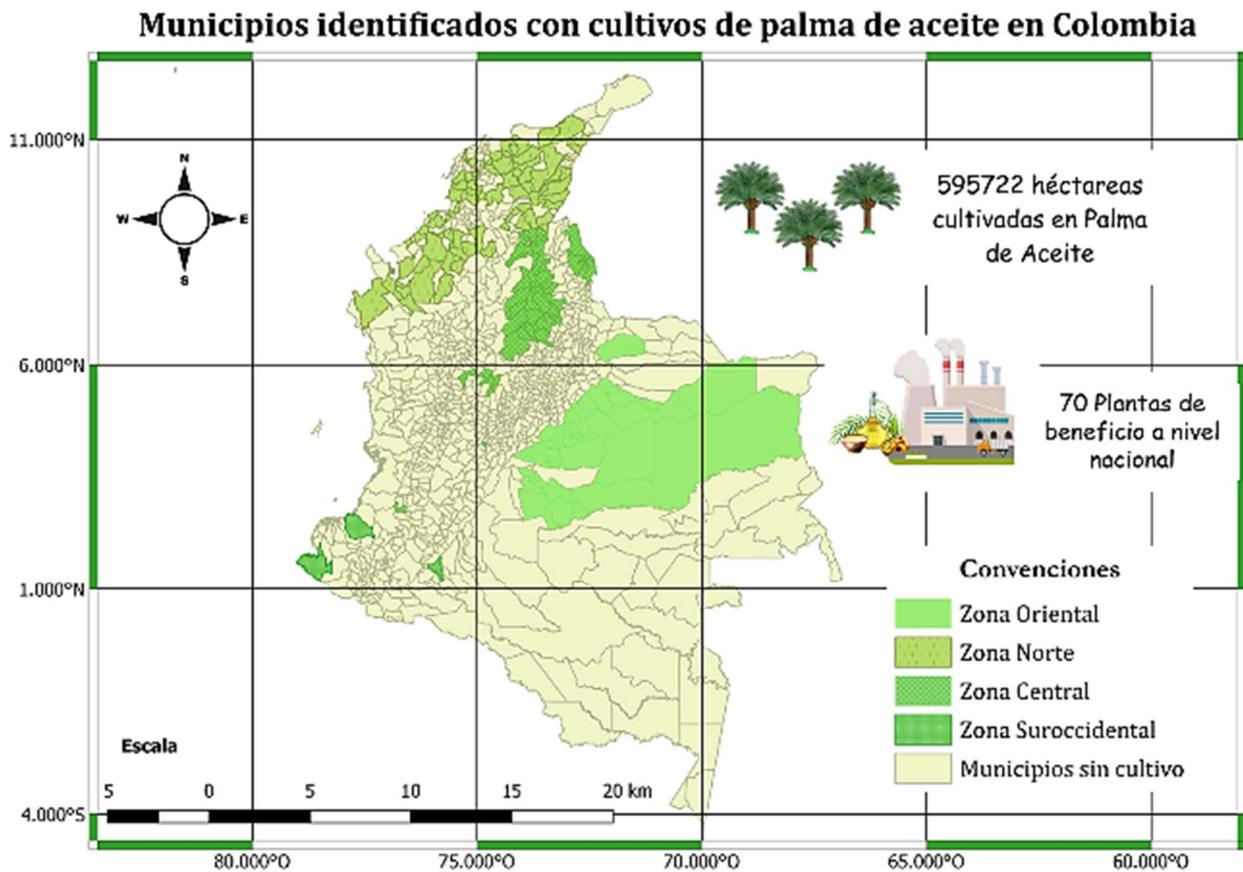


Figura 2. Municipios a nivel nacional que cuentan con cultivo de palma de aceite. Nota: Elaboración propia con base en información según (Sispa, 2021) y (Fedepalma, 2022).

En la figura 3 a, se puede observar que las áreas de producción desde el año 2010 al 2021 ha tenido un incremento del 124%, mientras que a nivel de producción de toneladas de fruto a aumentado el 138%. Mientras, en la figura 3 b, se muestra que para el periodo comprendido

entre los años 2017 a 2021, se va mantenido un incremento regulado de las áreas de cultivo siendo del 18%, evidenciándose de ésta manera como el cultivo de la palma de aceite se ha intensificado y a tenido un desarrollo acelerado

Especialización: Gestión Ambiental

Alternativas ambientales para el aprovechamiento de residuos sólidos y líquidos agroindustriales provenientes de la palma de aceite (Elaeis guineensis).

a nivel nacional, principalmente en las zonas ricas en recurso hídrico y climas tropicales.

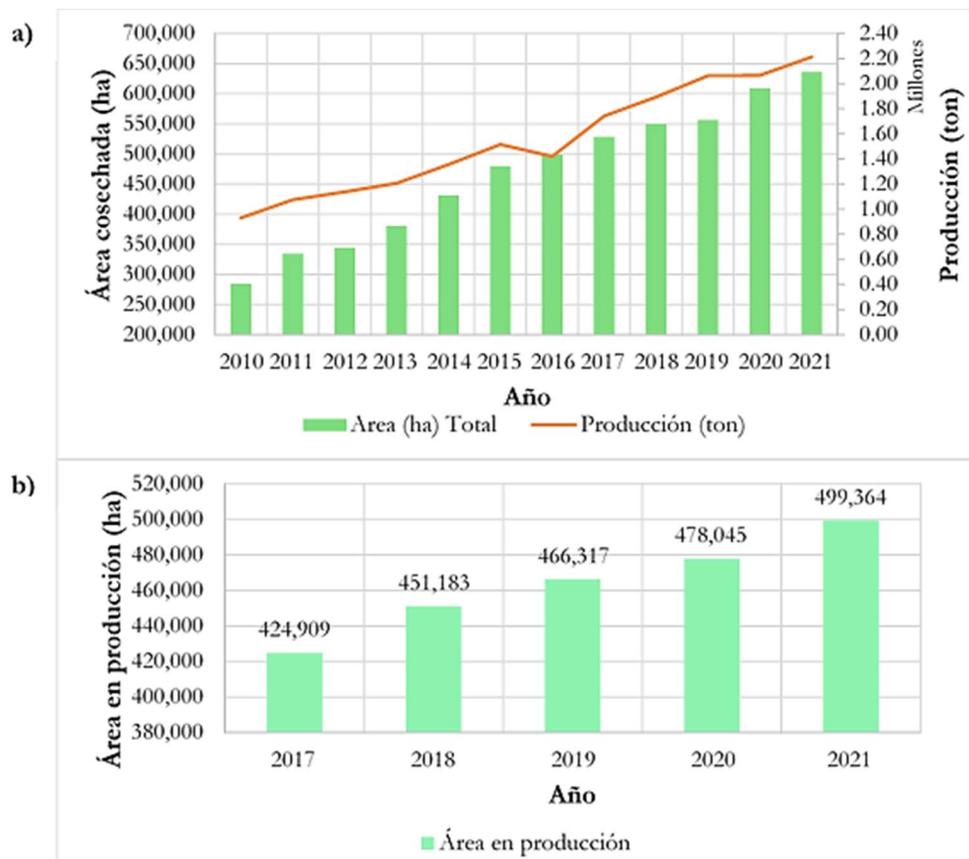


Figura 3. Área de producción y cantidad de fruto producido para el periodo 2017- 2010. Nota: En la figura 3 a, se observan las áreas de producción y su respectiva generación de RFF según (Agronet , 2021). En la figura 3b, se observan las áreas de producción periodo 2017-2021según (Fedepalma, 2022).

**Análisis de los residuos agroindustriales de palma a nivel nacional**

Con la finalidad de cuantificar los residuos agroindustriales derivados del procesamiento de la palma de aceite, a partir de las producciones

de los diferentes productos obtenidos de éstas, se calculó el porcentaje de pérdidas, es decir la proporción que se pierde en el proceso teniendo en cuenta la cantidad en toneladas de racimos de fruta fresca (RFF) que ingresan al proceso, como se observa en tabla

Tabla 2.

Porcentaje de pérdidas en el proceso de extracción de aceite de palma y otros derivados.

Productos	Central	Norte	Oriental	Suroccidental	Promedio
Fruto de palma de aceite (RFF)	2,304,199	1,773,151	3,180,266	228,300	1,871,479
Aceite de palma crudo	22%	21%	22%	21%	21%

Almendra de palma	5%	5%	4%	0%	3%
Aceite de palmiste crudo	2%	2%	1%	0%	1%
Torta de palmiste	3%	3%	2%	0%	2%
<b>Total pérdidas</b>	<b>69%</b>	<b>69%</b>	<b>71%</b>	<b>78%</b>	<b>72%</b>

*Nota:* Elaboración propia con información según (Fedepalma, 2022).

Según la tabla 2, a nivel de producción de derivados de palma de aceite, durante su etapa de extracción se generan diferentes porcentajes de pérdidas que se convierten en productos de desecho tanto sólidos como líquidos, este porcentaje varía en las diferentes zonas de producción, en este punto se muestra que en la zona suroccidental donde solo se produce como producto aceite de palma crudo la generación de

residuos es mayor, puesto que el porcentaje de pérdidas asciende a 78%, mientras que en las otras zonas (central, norte y oriental) en donde además de este producto se obtiene almendra de palma, aceite de palmiste crudo y torta de palmiste las pérdidas en el proceso se reducen al 71% y 69%. Sin embargo, cada proceso adicional trae consigo mayor huella de carbono.

**Tabla 3.**

*Cantidad de residuos generados, a partir del procesamiento de los racimos de fruta fresca (RFF) para el año 2021*

Zona	Área en producción (ha)	Producción de RFF (ton/año)	Porcentaje de pérdidas	Residuos generados (ton/año)
Central	161,402	2,524,394	69%	1,741,831.9
Norte	101,177	1,691,801	69%	1,167,342.7
Oriental	216,672	3,384,753	71%	2,403,174.6
Suroccidental	20,113	281,278	78%	219,396.8
<b>Total</b>	<b>499,364</b>	<b>7,882,226</b>	<b>72%</b>	<b>5,531,746.0</b>

*Nota:* Elaboración propia a partir de información según (Fedepalma, 2022).

En la tabla 3, se muestra la cantidad de residuos sólidos generados en la agroindustria de palma de aceite para el año 2021, calculados a partir de los RFF y el porcentaje de pérdidas, en esta se observa que en las zonas de mayor cultivo de palma de aceite existe una mayor producción de frutos y por siguiente, se genera más cantidad de residuos sólidos en su etapa de procesamiento en las extractoras, originándose 5,531,746.0 toneladas anuales; en donde el 43% corresponde

a la zona oriental, seguida de la zona central con un 31%, reflejando de esta manera el gran volumen de subproductos derivados de ésta actividad que sin un manejo adecuado, ocasionan un impacto negativo no solo en los cuerpos de agua sino también contribuye a la generación de gases de efecto invernadero, puesto que emiten CO<sub>2</sub> almacenado en forma de carbono en el tejido vegetal de los RFF (Henson & Chang, 2010).

**Tabla 4.**

*Cantidad teórica de residuos generados en la agroindustria de palma de aceite para el año 2021.*

Zona	Residuos sólidos (ton/año)	Residuos líquidos (ton/año)	Rácimos de Fruta vacíos- EFB (ton/año)	Cáscaras de Palmiste - OPS (ton/año)	Troncos de Palma- OPT (ton/año)	Fibra de palma prensada- PPF (ton/año)	Hojas de palma de aceite -OPF (ton/año)	Efluente de la fabricación de aceite de palma - POME (ton/año)	Destilado de ácidos grasos- PFAD (ton/año)
Central	2,967,456	523,669	606,251	151,044	351,644	371,822	1,492,631	72,266	6,284
Norte	1,860,190	328,269	380,037	94,684	220,432	233,082	935,675	45,301	3,939
Oriental	3,983,623	702,992	813,854	202,766	472,059	499,148	2,003,762	97,013	8,436
Suroccidental	369,788	65,257	75,548	18,822	43,820	46,334	186,003	9,005	783
<b>Total</b>	<b>9,181,057</b>	<b>1,620,186</b>	<b>1,875,690</b>	<b>467,316</b>	<b>1,087,955</b>	<b>1,150,386</b>	<b>4,618,072</b>	<b>223,586</b>	<b>19,442</b>

**Nota:** Elaboración propia, según (Fedepalma, 2022) y (Ofori Boateng & Lee , 2013)

En el proceso de extracción de aceite de palma y demás derivados, se originan diferentes tipos de biomasa residual que son considerados como corrientes secundarias de desecho, los cuales se muestran en la tabla 4, abarcan tanto residuos sólidos como líquidos; así como también los residuos de la planta que son generados en las plantaciones, como hojas y troncos de palma aceitera.

La información contemplada en la tabla 4, corresponde a un cálculo teórico en donde por cada hectárea de producción se generan 21,63 ton/año de residuos (Ofori Boateng & Lee , 2013), por ende, a partir de las hectáreas en producción actuales se realizaron las estimaciones de los residuos generados en la extracción de la palma de aceite y sus derivados. Según, la información para el año 2021, la cantidad de residuos agroindustriales de la palma aceitera (RPA) fue de 10'801,243 toneladas, donde 9'181,057 toneladas de residuos sólidos (RS) y el restante 1'620,186 ton/año a residuos líquidos (RL), compuestos por el efluente de fabricación de palma de aceite - POME (223,586 ton/año) y destilado de ácidos grasos - PFAD (19,442 ton/año), éstos líquidos corresponden a aguas residuales ácidas; con altas cargas orgánicas y por consiguiente, altas concentraciones de DQO, DBO y sólidos suspendidos (SS), contaminantes de las fuentes hídricas que alteran las características físicas,

químicas y biológicas, si son vertidas sin ningún tipo de tratamiento, adicionalmente estas aguas residuales son fuentes de emisión de gases de efecto invernadero como metano CH<sub>4</sub> y dióxido de carbono CO<sub>2</sub> (Abdurahman y otros, 2013).

En el aspecto de contaminación hídrica, es importante mencionar que la mayor parte de las áreas palmeras nacionales, se encuentran distribuidas en el área de influencia de 5 áreas hidrográficas (AH), principalmente en el AH del Orinoco y Magdalena-Cauca (en un 90%), además en 19 zonas hidrográficas (ZH) y 73 subzonas hidrográficas (SZH) (Fedepalma, 2022), reflejando de ésta manera la importancia y compromiso que tiene el sector palmero en el tratamiento de sus aguas residuales para mitigar los impactos derivados su vertimiento, así como también de optar por la incorporación de procesos más sostenibles y de cero residuos.

A nivel de campo la mayor parte de biomasa corresponde a la hoja de palma con una generación aproximada de 4'618,072 ton/año, mientras que la cantidad de biomasa de troncos de palma es de 1'087,955 ton/año, en donde su composición es en un 50% de agua para el caso de los troncos de palma de aceite, además también posee al igual que las hojas pequeñas proporciones de elementos como nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y calcio (Elbersen, 2013). Los residuos de hojas de palma de aceite, son producto de actividades de poda, éstas

generalmente no son utilizadas o sometidas a un proceso de transformación para aprovechar su composición, son depositadas en campo en las calles de la plantación formando lo que se conoce como paleras (Fedepalma & Cenipalma, 2001).

En el proceso de transformación en la planta extractora se obtienen como residuos, los racimos de fruta vacíos (EFB), conocido a su vez como raquis o tusa, para el año 2021 se estima que fueron 1'875.690 ton/año, constituyéndose como el residuo más generado, seguidamente de la fibra prensada (1'150,386 ton/año) y finalmente la cáscara de palmiste o cuesco con una generación de 467,316 ton/año; evidenciándose la variedad de subproductos de desecho que pueden reincorporarse al sistema o ser tratados para la obtención de nuevas materias primas o recuperación de materiales.

### Aprovechamiento o tratamiento de los residuos sólidos y líquidos derivados de la palma de aceite

En ésta sección para cada uno de los residuos generados en el sector de la palma de aceite, se muestran diferentes investigaciones realizadas sobre los diferentes usos, tratamientos o aprovechamientos que se le pueden aplicar a éstos, con la finalidad de obtener mayor valor agregado y minimizar algunos de los impactos ambientales derivados de la actividad, en la tabla 5, se presentan los productos que se pueden obtener mediante la aplicación de métodos innovadores que dan un mayor valor agregado a los subproductos.

**Tabla 5.**

*Productos derivados del tratamiento, aprovechamiento de los residuos generados por la actividad palmera*

Residuo	Método	Producto	Referencia
Hojas de palma de aceite (OPF)	Las hojas de palma de aceite preferiblemente maduras y en buen estado se les eliminan los foliolos y la epidermis pasan por un proceso de secado y prensado, obteniéndose un material de alta calidad con buena resistencia física y mecánica.	Tablero compuesto de hojas de palma comprimidas.	(Wahab y otros, 2022)
	Extracción de nutraceuticos con propiedades bioactivas como apigenina glicosilada y luteolina.	Compuestos bioactivos	(Idayu Tahir y otros, 2012)
	Las hojas de palma se cortan en trozos pequeños, se lavan con agua, se someten a secado en horno, posteriormente se trituran y se tamizan en la malla 60, estas partículas se maceración en etanol al 70% en relación 1/10 con agitación cada 6 horas por un día, luego se hacen filtraciones, maceración y evaporaciones hasta obtener un extracto espeso, el cual es mezclado con los productos químicos habituales para la fabricación de jabón.	Jabón sólido antibacteriano que inhibe la bacteria <i>Staphylococcus aureus</i>	(Febriani y otros, 2019)
	Las fibras de hojas de palma previamente cortadas y secadas, se trituran para obtener material fino, medio y grueso, los cuales son ubicados en diferentes proporciones en el espacio filtrante para tratar el POME.	Filtro de fibras de hojas de palma para tratamiento del (POME)	(Djun Lee y otros, 2021)

Residuo	Método	Producto	Referencia
Troncos de hoja de palma (OPT)	Conversión termoquímica de troncos y hojas de palma de aceite	Generación de energía en procesos de, gasificación, combustión y pirolisis	(Umar y otros, 2019)
	El tronco se divide en sus fracciones inferior, media y superior, a las cuales se les retira la corteza, se astillan, se secan; posteriormente son molidas y tamizadas para finalmente ser desmineralizadas en ácido sulfúrico y mezcladas con harinas de corteza de tronco.	Biopellets	(Wistara y otros, 2021)
	Obtención de carbón activado por proceso de pirolisis de troncos de palma de aceite	Biocarbón	(Hassan y otros, 2021)
Racimos de fruta vacíos (EFB)	Obtención de pulpa de papel, por medio de tratamiento mecánico semiquímico	Fibra para la fabricación de papel	(Akpan Sunday, 2022)
	Obtención de hidrógeno mediante, gasificación indirecta de racimos de fruta vacía de palma de aceite	Hidrógeno	(Vargas Mira y otros, 2019)
	Conversión de pirolisis termoquímica de pequeñas fibras de racimos de fruta vacíos (2mm)	Productos bioenergéticos como: biocarbón y bioaceite	(Rahayu y otros, 2021)
	Obtención de nanofibras de celulosa por medio de la hidrólisis de EBF con ácido sulfúrico	Nanofibras de celulosa	(Fahma y otros, 2010)
	Generación de energía por gasificación de EBF	Energía	(Ariffin y otros, 2017)
Cáscaras de palmiste (OPS)	Biocompostaje mediante la aplicación de microorganismos	Biofertilizante	(Shawon Mahmud & Phin Chong, 2021)
	Elaboración de briquetas a partir de una mezcla de aserrín y cáscaras de palmiste trituradas	Briquetas	(Obi, 2015)
	Producción de hidrógeno, por medio de la gasificación utilizando vapor de la cáscara de palmiste	Hidrógeno	(Hussain y otros, 2017)
	Producción de bio-carbono poroso a partir de un proceso de pirolisis auto-sostenible	Biocarbón	(Osman y otros, 2022)
		Combustible	(Umar y otros, 2020)

Alternativas ambientales para el aprovechamiento de residuos sólidos y líquidos agroindustriales provenientes de la palma de aceite (Elaeis guineensis).

Residuo	Método	Producto	Referencia
	Las cáscaras de palmiste por medio de gasificación son utilizadas como combustible para la producción de gas de síntesis		
	Para la fabricación de concreto de OPS, esta materia prima primero es sometida a un proceso de eliminación de impurezas y se combina con diferentes materiales	Hormigón de (OPS)	(Mannan & Ganapathy, 2004)
	Las cáscaras de palmiste son sometidas a un proceso de pirolisis en un horno anaeróbico a temperaturas entre los 500 a 800 °C durante 5 horas, obteniéndose el carbón insumo para la elaboración de las escobillas, utilizadas a nivel automotriz.	Escobillas de carbón	(Ugwu y otros, 2021)
<b>Fibras de palma prensadas (PFF)</b>	Elaboración de vermicompost con la mezcla del 50% del POME- y las fibras de palma de aceite (PFF)	Vermicompost	(Rupani y otros, 2017)
	Obtención de nanocristales de celulosa usando resina de intercambio catiónico	Nanocristales de celulosa	(Soo y otros, 2021)
<b>Destilado de ácidos grasos (PFAD)</b>	Esterificación del destilado de ácidos grasos de palma de aceite	Aceite base para biolubricante	( Soong Ng y otros, 2022)
	Obtención de biocombustible por reacciones de desoxigenación de destilados de ácidos grasos	Biocombustible	(Lam y otros, 2022)
	Extracción de fitoesteroles de PFAD, por medio de extracción en múltiples etapas extracción sólido-líquido, saponificación, extracción líquido-líquido y cristalización	Mezcla de fitoesteroles	( Nor Faizah y otros, 2020)
<b>Efluente de la fabricación de aceite de palma (POME)</b>	Producción de biogás mediante la digestión anaerobia del POME	Biogás	( Lok y otros, 2020)
	Obtención de biodiesel por ruta metabólica (bio-remediación) utilizando hongos oleaginosos	Biodiesel	(Athoillah & Ahmad, 2022)

**Nota:** Elaboración propia a partir de información artículos científicos.

Según la tabla 5, los residuos resultantes de la actividad agroindustrial de producción de palma de aceite tanto a nivel en campo como en las extractoras, debido a su composición tiene diversos usos y utilidades mediante la aplicación

de diferentes métodos, los cuales pueden proporcionar a esta biomasa un valor agregado y una alternativa de tratamiento diferente al compostaje; en este sentido se puede obtener bioenergía, biocombustibles, biomateriales (nanomateriales, carbón activado, biopellets),

Alternativas ambientales para el aprovechamiento de residuos sólidos y líquidos agroindustriales provenientes de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*).

así como también extraer tanto de la biomasa como de los efluentes compuestos químicos como los tocoferoles y otros compuestos

utilizados en como insumo para fabricación de vitamina E (Gore & Bhagwat, 2022), además de compuestos lignocelulósicos como la celulosa comúnmente utilizada en la industria del papel.

Respecto a lo mencionado anteriormente, es importante resaltar que en país existe una pequeña proporción correspondiente a un 11% de plantas extractoras que han implementado sistemas de aprovechamiento para la extracción de gas metano liberado por los efluentes líquidos de la planta, que consiste en lagunas anaerobias emisoras de biogás (CH<sub>4</sub>), el cual es recirculado y usado como energía para la misma industria incluso 2 plantas de las 8 producen excedentes de energía, obteniendo de esta manera un ingreso adicional por la venta del mismo. En lo que se refiere a residuos de carácter sólido el 36% de las plantas extractoras presentes a nivel nacional cuentan con sistemas de compostaje, algunas lo comercializan y otras lo aplican como insumo orgánico para sus plantaciones (Fedepalma, 2022). Por lo tanto, se refleja que el sector palmero ha incorporado algunos métodos de tratamiento para sus residuos sólidos y líquidos, como medida para contrarrestar los impactos generados en el sector, pero a su vez todas las plantas de beneficio deberían aplicar el concepto de cero residuos y economía circular, puesto que al ser una de las actividades agrícolas más practicadas a nivel mundial cuentan con información científica suficiente para transformar su industria en una producción autosostenible y sustentable que incorpore nuevas tecnologías de aprovechamiento y tratamiento eficientes e innovadores para los residuos sólidos y líquidos; adicionalmente el uso de nuevas tecnologías debe tener en cuenta el análisis o viabilidad financiera así como también

el análisis de ciclo de vida (Alkarimiah y otros, 2022).

## Conclusiones

En síntesis, el cultivo de palma de aceite, así como también su beneficio en la agroindustria ha tenido una expansión o crecimiento considerable en el país, puesto que existen aproximadamente más de 500 mil hectáreas en producción y más de 600 mil hectáreas en total distribuidas en mayor proporción en la zona oriental, central y norte, en este aspecto es importante indicar que la información respecto a áreas totales y en producción registradas por Fedepalma difieren de otras entidades, por lo tanto se requiere la actualización de la información para tener una cuantificación lo más exacta posible del total de área con cultivos perennes de palma de aceite, en donde se incluya no solo los cultivos registrados en la entidad sino también aquellos que no lo están a fin de tener la cuantificación y especialización actualizada.

En relación a la generación de biomasa residual, según los cálculos realizados, se estima que en promedio el 72% de la producción de racimos de fruta fresca, se convierte en residuos, los cuales alcanzaron para el año 2021 una cantidad total de 5,531,746 toneladas, conformados por raquis, fibras de palma prensadas, cáscaras de palmiste y efluentes líquidos; adicionalmente a nivel de plantaciones también se produce una cantidad considerable de biomasa compuesta por hojas de palma y troncos de la misma resultantes de las actividades de poda que según estimaciones teóricas alcanzan anualmente 5'706,027 toneladas, la cual es desperdiciada y no se le efectúa ningún tipo de tratamiento.

Finalmente, según la revisión documental e investigativa realizada existe un buen potencial para el aprovechamiento no sólo de los residuos sólidos sino también los residuos líquidos, puesto que existe un amplio contenido e investigaciones científicas que lo respalda, en donde se sugiere

además de sistemas de compostaje, la obtención de energía (biogás, biocombustibles, hidrógeno, biodiesel, bioetanol, bioaceite), biomateriales (biocarbón, nanomateriales, biopellets, briquetas), bioactivos (fitoesteroles), pulpa de papel (celulosa), incluso se pueden fabricar filtros para tratar el POME con residuos como las fibras de la hoja de palma, reflejando de esta manera los múltiples usos y valores agregados que se pueden dar a los residuos resultantes del aprovechamiento de la palma de aceite; mediante la aplicación de diferentes tecnologías y métodos innovadores que minimizan los impactos ambientales.

En contraste, aunque en Colombia se han venido incorporando tratamientos para los residuos de la palma, el 64% de las plantas de beneficio no tratan los residuos sólidos y el 89% no controlan la emisión de GEI, por lo tanto, se requiere que el sector palmero tenga un compromiso claro hacia la transformación de su producción hacia una producción sostenible en donde se incorpore como factor clave la investigación y la innovación.

## Referencias

- Anima Antwi, L. A., Nimoh, F., Agyemang, P., & Akurugu Apike, I. (2023). Perception and adoption of free fatty acid reduction techniques by small scale palm oil processors: Evidence from Ghana. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100462>
- Lok, X., Chan, Y. J., & Foo, D. (2020). Simulation and optimisation of full-scale palm oil mill effluent (POME) treatment plant with biogas production. *Journal of Water Process Engineering*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101558>
- Mussatto, S. I., Ballesteros, L. F., Martins, S., & Teixeira, J. A. (2012). Use of Agro-Industrial Wastes in Solid-State Fermentation Processes. En K.-Y. Show (Ed.), *Industrial Waste*. <https://www.intechopen.com/chapters/30860>
- Nor Faizah, J., Noorshamsiana, A. W., Wan Hasamudin, W. H., Astimar, A. A., Kamarudin, H., & Ab Gapor, M. T. (2020). Production of phytosterols mix from palm fatty acid distillate (PFAD) through multi-staged extraction processes. *Engineering Science and Technology*. 736. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/736/2/022047>
- Obi, O. F. (2015). Evaluation of the physical properties of composite briquette of sawdust and palm kernel shell. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 5, 271–277. <https://doi.org/10.1007/s13399-014-0141-7>
- Soong Ng, B. Y., Chyuan Ong, H., Nang Lau, H. L., Shafizah Ishak, N., Elfasakhany, A., & Voon Lee, H. (2022). Production of sustainable two-stroke engine biolubricant ester base oil from palm fatty acid distillate. *Industrial Crops and Products*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114224>
- Vargas Mira, A., Zuluaga García, C., & González Delgado, Á. D. (2019). A Technical and Environmental Evaluation of Six Routes for Industrial Hydrogen Production from Empty Palm Fruit Bunches. *ACS Omega*, 4(13), 15457-15470. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b01683>
- Yahya, A., Khalid, N. A., & Salleh, M. M. (2022). Biocompost from Oil Producing Plants. En S. Abd Aziz, M. Gozan, M. F. Ibrahim, & L. Y. Phang (Edits.), *Biorefinery of Oil Producing Plants for Value-Added Products*. <https://doi.org/10.1002/9783527830756.ch30>
- Abdurahman, N. H., Rosli, R. M., & Azhari, N. H. (2013). La evaluación del desempeño de los métodos anaeróbicos para el tratamiento de efluentes de molinos de aceite de palma (POME): una revisión.

- En . W. Trevelyan Quinn (Ed.), *International Perspectives on Water Quality Management and Pollutant Control*. <https://doi.org/10.5772/54331>
- Agronet . (2021). *Red de información y comunicación del sector agropecuario colombiano*. Reporte: Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo: Caso palma de aceite : <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- Akpan Sunday , N. (2022). Oil Palm Empty Fruit Bunches (OPEFB) – Alternative Fibre Source for Papermaking. En H. Kamyab (Ed.), *Elaeis guineensis*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98256>
- Alkarimiah, R., Makhtar, M. M., Aziz, H. A., Vesilind, P. A., Wang, L. K., & Hung, Y. T. (2022). Energy Recovery from Solid Waste. En L. K. Wang, M. S. Wang, & Y. T. Hung (Eds.), *Solid Waste Engineering and Management. Handbook of Environmental Engineering* (págs. 231–297). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-96989-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-96989-9_5)
- Andreichenko, A., Andreichenko, S., & Smentyna, N. (2021). Ensuring Biosphere Balance in the Context of Agricultural Waste Management. *Philosophy and Cosmology*, 26, 46-61. <https://doi.org/10.29202/phil-cosm/26/4>
- Ariffin , M. A., Wan Mahmood, W. M., & Yramizi Mohamed , Z. H. (2017). Medium-scale gasification of oil palm empty fruit bunch for power generation. *Journal of Material Cycles and Waste Management* , 19, 1244–1252. <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0518-8>
- Athoillah, A. Z., & Ahmad, F. B. (2022). Biodiesel Production from Bioremediation of Palm Oil Mill Effluent via Oleaginous Fungi. *Clean – Soil, Air, Water*, 50(4). <https://doi.org/10.1002/clen.202200025>
- Baruah, B. K. (2011). Agribusiness Management, its meaning, nature and scope, types of management tasks and responsibilities. (A. A. University, Ed.) <https://www.virtualpro.co/biblioteca/gestion-en-la-agroindustria-su-significado-naturaleza-y-alcances-tipos-de-tareas-y-responsabilidades-de-gestion>
- Borsellino, V. (2019). Agribusiness. En W. Leal Filho, A. Azul, L. Brandli, P. Özuyar, T. Wall, & C. Springer (Ed.), *Zero Hunger*. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-69626-3\\_1-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-69626-3_1-1)
- Cantão Freitas, L., Rodrigues Barbosa, J., Caldas da Costa, A. L., Figueiredo Bezerra, F. W., Holanda Pinto, R. H., & de Carvalho Junior, R. N. (2021). From waste to sustainable industry: How can agro-industrial wastes help in the development of new products? *Resources, Conservation and Recycling*, 169. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105466>
- Coral Medina, J. D., Magalhães Júnior, A. I., Zamora, H. D., & Quijano Melo, J. D. (2019). Oil palm cultivation and production in South America: status and perspectives. *Biofuels, Bioprod. Bioref*, 13(5), 1202-1210. <https://doi.org/10.1002/bbb.2013>
- DANE. (2020). *Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2019*. Bogotá: Departamento Administrativo Nacional de Estadística. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena>
- DANE. (2022). *Economía Circular Sexto Reporte:2022*. (C. A. Cely Ruiz, G. A. Quintero Hernández, & M. N. Dimaté Echeverry, Edits.) Departamento Administrativo Nacional de Estadística. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/ambientales/economia-circular/reportes-de-economia-circular>
- Dirkes,, R., Neubauer, P. R., & Rabenhorst, J. (2021 ). Pressed sap from oil palm (*Elaeis guineensis*) trunks: a revolutionary growth medium for the biotechnological industry? *Biofuels, Bioprod. Bioref*, 15(3), 931-944. <https://doi.org/10.1002/bbb.2201>

- Djun Lee , M., Amirah Mohamad, N. F., Abu Hassan, N., & San Lee, P. (2021). Performance of Oil Palm Frond Fiber as Filtration Material in Palm Oil Mill Effluent Treatment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 690. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/690/1/012039>
- Dungani, R., Pingkan, A., Aprilia, S., Karnita , Y., Karliati, T., Suwandhi, I., & Sumardi, I. (2018). *Biomaterial from Oil Palm Waste: Properties, Characterization and Applications*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.76412>
- Elbersen, W. (2013). Residuos de aceite de palma disponibles para la bioeconomía, junto con el reciclaje de nutrientes. *Palmas*, 34(Especial. Tomo II), 61.
- Erfani Jazi, M., Narayanan , G., Aghabozorgi, F., Farajidizaji , B., Aghaei, A., Kamyabi, M. A., Navarathna, C. M., & Mlsna, T. E. (2019). Structure, chemistry and physicochemistry of lignin for material functionalization. *SN Applied Sciences*, 1(Article number: 1094). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1126-8>
- Fahma, F., Iwamoto, S., Hori, N., Tadahisa, I., & Takemura, A. (2010). Isolation, preparation, and characterization of nanofibers from oil palm empty-fruit-bunch (OPEFB). *Cellulose*, 17, 977–985. <https://doi.org/10.1007/s10570-010-9436-4>
- Febriani, A., Syafriana, V., Afriyanto , H., & Djuhariah , Y. S. (2019). The Utilization of Oil Palm Leaves (*Elaeis guineensis* Jacq.) Waste as an Antibacterial Solid Bar Soap. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 572. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/572/1/012038>
- Fedepalma , & Cenipalma . (2001). *El cultivo de la palma de aceite y su beneficio. Guía para el nuevo palmicultor*. Bogotá: Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite y Centro de Investigación en Palma de Aceite.
- Fedepalma. (2007). *La Agroindustria de la Palma de Aceite en Colombia*. Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite.
- Fedepalma. (2022). *Anuario Estadístico: Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo 2017-2021*. Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/issue/view/1620/178>
- Feofilova, E. P., & Mysyakina, I. S. (2016). Lignin: Chemical structure, biodegradation, and practical application (a review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, 52(6), 559–569. <https://doi.org/10.1134/S0003683816060053>
- Gore, A. J., & Bhagwat, S. S. (2022). Separation of tocol (tocopherol & tocotrienol) and phytosterols from palm fatty acid distillate by saponification and purification by low temperature solvent crystallization. *Journal of Food Science and Technology*, 59, 2962–2971. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05402-7>
- Handique, S., Saha, A., Saikia, K. K., & Gogoi, N. (2023). Agriculture Wastes: Generation and Sustainable Management. En S. Singh, P. Singh, A. Sharma, & M. Choudhury (Edits.), *Agriculture Waste Management and Bioresource* (págs. 78-104). John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119808428.ch4>
- Hassan, N., Abdullah, R., Khadiran, T., Elham, P., & Vejan , P. (2021). Biochar derived from oil palm trunk as a potential precursor in the production of high-performance activated carbon. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01797-z>
- Henson, I. E., & Chang, K. C. (2010). Evaluación del impacto de la producción de aceite de palma sobre el calentamiento global: (I) Un modelo de campo. *Palmas*, 31(3), 47-61.

- <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1496/1496>
- Hussain, M., Tufa, L. D., Yusup, S., Zabiri, H., & Taqvi, S. A. (2017). Aspen Plus® Simulation Studies of Steam Gasification in Fluidized Bed Reactor for Hydrogen Production Using Palm Kernel Shell. En M. Mohamed Ali, H. Wahid, N. Mohd Subha, S. Sahlan, M. Yunus, & A. Wahap (Edits.), *Modeling, Design and Simulation of Systems* (Vol. 751). Singapore: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6463-0\\_54](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6463-0_54)
- Idayu Tahir, N., Shaari, K., Abas, F., Ahmad Parveez, G. K., Ishak, Z., & Salamah Ramli, U. (2012). Characterization of Apigenin and Luteolin Derivatives from Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) Leaf Using LC–ESI-MS/MS. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(45), 11201-11210. <https://doi.org/10.1021/jf303267e>
- Isogai, A. (2014). Cellulose. En S. Kobayashi, & K. Müllen (Edits.), *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials* (págs. 1–11). Heidelberg, Berlin: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-36199-9\\_320-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-36199-9_320-1)
- Lam, J. E., Rahman Mohamed, A., Kay Lup, A. N., & Koh, M. K. (2022). Palm fatty acid distillate derived biofuels via deoxygenation: Properties, catalysts and processes. *Fuel Processing Technology*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107394>
- López Macías, F. J., & Castrillón, P. (2009). *Evolución y desarrollo de la agroindustria (AI), en Colombia*. Universidad de Manizales. <https://www.virtualpro.co/biblioteca/evolucion-y-desarrollo-de-la-agroindustria-ai-en-colombia>
- Mannan, M. A., & Ganapathy, C. (2004). Concrete from an agricultural waste-oil palm shell (OPS). *Building and Environment*, 38(4). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.10.007>
- Maulina, S., & Anwari, F. N. (2018). Utilization of oil palm fronds in producing activated carbon using Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> as an activator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 309. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/309/1/012087>
- Mohanty, A., Prangya Ranjan, R., Dubey, B., Singh Meena, S., Pal, P., & Goel, M. (2022). A critical review on biogas production from edible and non-edible oil cakes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12, 949–966. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01292-5>
- Norhazimah, A. H., Siti, F., Aida, M., Dilaeleyana, A. B., & Nur Shahirah, M. A. (2020). Direct Fermentation of Oil Palm (*Elaeis guineensis*) Trunk Sap to Bioethanol by *Saccharomyces cerevisiae*. *2nd International Conference on Materials Technology and Energy 6-8 November 2019, Miri, Sarawak, Malaysia*. 943. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/943/1/012012>
- Ofori Boateng, C., & Lee, K. T. (2013). Sustainable utilization of oil palm wastes for bioactive phytochemicals for the benefit of the oil palm and nutraceutical industries. *Phytochemistry Reviews*, 12(1), 173–190. <https://doi.org/10.1007/s11101-013-9270-z>
- Okolie, J. A., Nanda, S., Dalai, A. K., & Kozinski, J. A. (2021). Chemistry and Specialty Industrial Applications of Lignocellulosic Biomass. *Waste and Biomass Valorization*, 12(5), 2145–2169. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01123-0>
- Olatunji, K. O., Ahmed, N. A., & Ogunkunle, O. (2021). Optimization of biogas yield from lignocellulosic materials with different pretreatment methods: a review. *Biotechnology for Biofuels*, 14(159). <https://doi.org/10.1186/s13068-021-02012-x>
- Osman, M. S., Ting, D. S., & Cheong, K. Y. (2022). Development of self-sustainable

- pyrolysis system to produce porous biochar from palm kernel shell. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02668-x>
- PNUMA. (2021). *Informe sobre el índice de desperdicio de alimentos 2021*. Nairobi : Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. <https://www.unep.org/resources/report/unep-food-waste-index-report-2021>
- Poku, K. (2002). *Small-Scale Palm Oil Processing in Africa*. FAO Agricultural Services Bulletin 148, Food and Agriculture Organization Of The United Nations, Roma. <https://www.fao.org/3/Y4355E/y4355e00.htm#Contents>
- Rahayu , D. E., Karnaningroem, N., Altway , A., & Slamet, A. (2021). Utilization of oil palm empty fruit bunches biomass through slow pyrolysis process. *4th International Conference on Bioscience and Biotechnology 16-18 August 2021, Indonesia (Virtual)*. 913. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/913/1/012018>
- Ribeiro Martins, J., Manabu Abe, M., & Brienzo, M. (2022). Chemical Modification Strategies for Developing Functionalized Hemicellulose: Advanced Applications of Modified Hemicellulose. En M. Brienzo (Ed.), *Hemicellulose Biorefinery: A Sustainable Solution for Value Addition to Bio-Based Products and Bioenergy*. *Clean Energy Production Technologies*. (págs. 171–205). Singapore: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3682-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3682-0_6)
- Romero Peláez, R. D., Chaves Oliveira, M. E., Gerard Miller, R. N., Moreira de Almeida, J. R., & Gonçalves de Siqueira, F. (2022). Biotechnological valorization of lignocellulosic residues from the oil palm industry: status and perspectives. *Biomass Conversion and Biorefinery* . <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02637-4>
- Rupani, P. F., Embrandiri, A., & Ibrahim, M. H. (2017). Recycling of palm oil industrial wastes using vermicomposting technology: its kinetics study and environmental application. *Environmental Science and Pollution Research* , 24, 12982–12990. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8938-0>
- Samanta, P., Senapati, T., Dey, S., & Ghosh, A. R. (2023). An Overview of Biomass Conversion from Agricultural Waste. En S. Singh, P. Singh, A. Sharma, & M. Choudhury (Edits.), *Agriculture Waste Management and Bioresource* (págs. 46-77). John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119808428.ch3>
- Saval, S. (2012). Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado, Presente y Futuro. *Biotecnología*, 16(2), 14-46. [https://smbb.mx/wp-content/uploads/2017/10/Revista\\_2012\\_V16\\_n2.pdf](https://smbb.mx/wp-content/uploads/2017/10/Revista_2012_V16_n2.pdf)
- Shawon Mahmud, M., & Phin Chong, K. (2021). Formulation of biofertilizers from oil palm empty fruit bunches and plant growth-promoting microbes: A comprehensive and novel approach towards plant health. *Journal of King Saud University - Science*, 33(8). <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101647>
- Sispa . (2021). *Sistema de Información Estadística del Sector Palmero*. Evolución histórica del número de municipios con cultivos de Palma de Aceite en Colombia: <http://sispaweb.fedepalma.org/sispaweb/default.aspx?Control=Pages/areas>
- Soo, Y. T., Ng, S. W., Tang, T. K., Ab Karim, N. A., Phuah, E. T., & Lee, Y. Y. (2021). Preparation of palm (*Elaeis oleifera*) pressed fibre cellulose nanocrystals via cation exchange resin: characterisation and evaluation as Pickering emulsifier. *Science of Food and Agriculture*, 101(10), 4161-4172. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11054>
- Tan, Y. A., Sambanthamurthi, R., Sundram, K., & Wahid, M. B. (2007). Valorisation of

- palm by-products as functional components. *European Journal of Lipid Science and Technology* , 109(4), 380-393.  
<https://doi.org/10.1002/ejlt.200600251>
- Trevors, J., & Saier, M. (2010). AgriBusiness versus AgriCulture. *Agua Aire Suelo Contaminación* , 205((Suplemento 1)), 35–36.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11270-007-9431-z>
- Ugwu, S. C., Inegbenebor, A. O., Fayomi, O., & Udoye, N. E. (2021). Preparation of Carbon Brushes from Agro-Waste Materials Palm Kernels Shells for Automobile Industry. *International Conference on Engineering for Sustainable World (ICESW 2020) 10th-14th August 2020, Ota, Nigeria*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1107/1/012188>
- Umar, H. A., Sulaiman, S. A., Ahmad, R. K., & Tamili, S. N. (2019). Characterisation of oil palm trunk and frond as fuel for biomass thermochemical. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 863.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/863/1/012011>
- Umar, H. A., Sulaiman, S. A., Said, M., & Ahmad, R. K. (2020). Palm Kernel Shell as Potential Fuel for Syngas Production. En S. S. Emamian, M. Awang, & F. Yusof (Edits.), *Advances in Manufacturing Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Singapore: Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-15-5753-8\\_25](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5753-8_25)
- Uraki, Y., & koda , k. (2014). Lignin. En S. Kobayashi , & K. Müllen (Edits.), *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials*. Heidelberg, Berlin : Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-36199-9\\_325-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-36199-9_325-1)
- Vandamme , E. J. (2009). Agro-Industrial Residue Utilization for Industrial Biotechnology Products. En P. Nigam, & A. Pandey (Edits.), *Biotechnology for Agro-Industrial Residues Utilisation* (Vol. 56, págs. 3-11). Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9942-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9942-7_1)
- Wahab, R., Mat Rasat, M. S., Mohd Fauzi, N., Saiful Sulaiman, M., Samsi, H. W., Mokhtar, N., Mohd Ghani , R. S., & Haziq Razak, M. (2022). Processing and Properties of Oil Palm Fronds Composite Boards from *Elaeis guineensis*. En H. Kamyab (Ed.), *Elaeis guineensis*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98222>
- Wistara , N. J., Diputra, P., & Hendra, P. (2021). Biopellet from demineralized oil palm trunk. *The 13th International Symposium of Indonesian Wood Research Society 2 September 2021, Mataram, Indonesia*. 891. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/891/1/012022>
- Yafetto, L., Tawia Odamttan, G., & Wiafe-Kwagyan, M. (2023). Valorization of agro-industrial wastes into animal feed through microbial fermentation: A review of the global and Ghanaian case. *Heliyon*, 9(4).  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14814>

## Impactos ambientales generados en la producción de café pergamino seco

Viviana Ardila Rivero<sup>1</sup>

Universidad LIBRE, Colombia, viviana-ardila@unilibre.edu.co

ISSN: 2590-6704

### RESUMEN

En Colombia, el café ha sido un importante factor de desarrollo económico y social, además, es reconocido por su delicioso sabor, cuerpo y aroma. En los últimos años el sector cafetero ha incrementado en extensión por consiguiente su producción, lo cual implica la generación de diversos impactos ambientales en la cadena de producción de café pergamino seco, la cual incluye los procesos que se desarrollan en la finca, desde la semilla hasta la cosecha y el beneficio del grano como: germinación, almacigo, siembra, mantenimiento, beneficio y secado; en las cuales se generan diferentes aspectos ambientales que son susceptibles de generar impactos al medio ambiente los cuales es importante identificar con el fin de definir diferentes prácticas ambientales, que permitan reducir estos efectos negativos sobre los recursos naturales. Método: el objetivo de este trabajo consistió en realizar una revisión sistemática de diferente literatura donde se haya evaluado los diferentes impactos ocasionados por los sistemas de producción de café sobre los diferentes componentes agua, suelo, fauna, flora y aire a nivel mundial, nacional, regional y local. Resultados: Los resultados indican que dentro de los procesos de producción de café pergamino seco que generan mayores impactos ambientales se encuentran en el proceso de mantenimiento por el uso de insumos como plaguicidas y herbicidas, y en el proceso del beneficio de café que incluye el despulpado y lavado del café debido a los subproductos generados mucilago y pulpa.

**Palabras Clave:** Producción, café, impactos ambientales, germinación, almacigo, herbicidas, plaguicidas, erosión, beneficio, subproductos, flora, fauna, secado.

### ABSTRACT

In Colombia, coffee has been an important factor in economic and social development, and is also recognized for its delicious flavor, body, and aroma. the coffee sector has increased in extension consequently its production, which implies the generation of various environmental impacts in the dry parchment coffee production chain, which includes the processes that take place on the farm, from the seed to the harvest and the benefit of the grain such as: germination, seedling, planting, maintenance, benefit and drying; in which different environmental aspects are generated that are likely to generate impacts on the environment, which it is important to identify in order to define different environmental practices, which allow reducing these negative effects on natural resources. The objective of this work was to carry out a systematic review of different literature where the different impacts caused by coffee production systems on the different components water, soil, fauna, flora and air at a national, regional and specific level in the municipality of Socorro. The results indicate that within the dry parchment coffee production processes that generate the greatest environmental impacts are in the maintenance process due to the use of inputs such as pesticides and herbicides, and in the coffee benefit process that includes pulping and washing. of coffee due to the by-products generated mucilage and pulp.

**Keywords:** Production, coffee, environmental impacts, germination, seedling, herbicides, pesticides, erosion, benefit, by-products, flora, fauna, drying.

### 1. INTRODUCCIÓN

La producción de café en Colombia ha sido catalogada en el mundo como una de las mejores, debido a que el café que se produce en el campo Colombiano presenta excelentes características en su sabor, aroma y textura, además, el sector cafetero es de vital importancia debido a que es la actividad económica de innumerables familias que llevan el sustento a su hogar gracias a este producto, recientemente se ha presentado un aumento significativo de la producción de café y cada día más crece el interés en la implementación de este cultivo que aporta beneficios económicos de muchos hogares, pero, es importante considerar que al incrementar esta actividad aumenta la generación de impactos ambientales, por tanto la importancia de identificar y controlar las diferentes actividades que pueden ocasionar afectación a uno o todos los componentes del medio ambiente.

Por lo anterior, diferentes estudios han evidenciado que en el proceso productivo de café se han identificado acciones susceptibles de generar impactos ambientales sobre los diferentes componentes y elementos del medio ambiente, principalmente sobre los recursos agua y suelo; por eso el aumento en la importancia de que el gobierno, las autoridades ambientales de control, y otras entidades de apoyo, exijan la adopción de una planificación y gestión ambiental en el sector cafetero que permita un uso responsable de los recursos naturales. A continuación, se puede observar la representación de un sistema de producción de café con sus respectivos componentes entradas, procesos y salidas y como interactúan entre ellos. Analizando lo que ocurre en las fincas cafeteras, para el caso de las entradas corresponde a insumos, mano de obra y uso de recursos; los procesos hacen referencia a las actividades que se desarrollan como siembra, fertilización, control de enfermedades y arvenses y beneficio; finalmente se encuentran las salidas que para este caso es el café pergamino seco. Sin embargo, al considerar el componente ambiental se generan salidas como residuos y emisiones.



Esquema del sistema de producción de café (Tomado de Duque et al., 2005).

De acuerdo a lo anterior, el desarrollo de la caficultura contempla diversas etapas, desde la semilla hasta el beneficio y secado del grano; las cuales contemplan la generación de impactos en términos ambientales, los cuales es importante identificar con el fin de optimizar los procesos de planificación y establecer diferentes medidas de manejo ambiental, aunar los criterios de control y seguimiento entre caficultores, autoridades y entidades de apoyo, fortaleciendo la gestión ambiental que permitan la conservación de los recursos naturales en el sector cafetero.

Por lo anterior, a continuación, se exponen las diferentes etapas en un sistema general de producción del café, con los aspectos susceptibles a producir impacto. Para empezar, en la etapa de instalación del cultivo (germinador) se emplea fungicida en la desinfección del sustrato (arena) lo cual trae un impacto ambiental sobre el recurso suelo debido a la solución que es empleada (agua + fungicida) la cual si se infiltra podría causar la contaminación del suelo, aunque ocasionalmente este impacto es poco analizado y considerado, seguidamente, se encuentra la etapa de almácigo la cual implica el uso de nematicidas, herbicidas y fertilizantes causando

contaminación del suelo y agua, además del uso de bolsas plásticas (polietileno) donde se siembra la plántula; en cuanto a la etapa de siembra se realizan las acciones de ahoyado lo que en efecto podría ocasionar erosión ; una vez establecido el cultivo se encuentra la etapa de mantenimiento o sostenimiento en la cual comprende el manejo de arvenses generando aspectos ambientales como realizar prácticas inadecuadas en el momento de la deshierba dejando el suelo desprotegido, remover radicalmente el suelo en terrenos con pendientes fuertes ocasionado erosión, asimismo la etapa de nutrición comprende el uso de abonos químicos ocasionando disminución de la fertilidad del suelo y dependencia por el empleo de fertilizantes químicos y contaminación de fuentes hídricas; por otra parte se encuentra el control fitosanitario empleando agroquímicos, insecticidas y fungicidas ocasionando contaminación del recurso agua y contaminación con residuos sólidos (envases de agroquímicos) por su inadecuado manejo y disposición final , otra etapa importante a considerar en la producción del café es la renovación lo cual implica que el suelo quede descubierto siendo susceptible a generar erosión, posteriormente, se encuentra la etapa del beneficio del café en la cual, si se realiza un inadecuado manejo y disposición de los subproductos (mucilago y pulpa) puede ocasionar la contaminación del componente agua y del suelo; por último, se encuentra la etapa del secado del grano donde se obtiene el café pergamino seco; donde un uso inapropiado y no calibración de las máquinas de secado (silos) pueden ocasionar contaminación del recurso aire por las emisiones atmosféricas de estas fuentes fijas.

Por lo anterior, la actividad cafetera en Colombia ha sido de vital importancia para el crecimiento económico, generación de empleo y el sustento familiar, sin embargo, esto trae consigo la generación de impactos ambientales negativos.

Para el caso de Colombia, actualmente la entidad responsable de apoyar los procesos de planificación y seguimiento del cultivo del café está a cargo de la Federación Nacional de

Cafeteros a través del servicio de extensión que busca favorecer la preservación de los diferentes ecosistemas en las zonas cafeteras y la adaptación y mitigación al cambio climático con el apoyo de organismos internacionales con el fin de promover la sostenibilidad del cultivo de café, además, otras entidades vinculadas al sector cafetero como ECOM, cuyo propósito es fomentar y apoyar la actividad cafetera motivando al cuidado y preservación del medio ambiente; además, se encuentran los programas Rainforest Alliance, CAFÉ practices, FLO , los cuales motivan a los caficultores a realizar prácticas adecuadas en la producción de café disminuyendo los impactos negativos al medio ambiente, brindando una certificación a los predios cafeteros.

Por lo anterior, frente a la pregunta de cuáles acciones desarrolladas en la obtención de café pergamino seco son susceptibles de producir impactos adversos al medio ambiente, se plantea la conveniencia de revisar de forma objetiva y sistemática con el fin de indagar los resultados de estudios empíricos desarrollados en el mundo, en Colombia, en Santander y el municipio del Socorro, y realizar un análisis de los diferentes factores del tema. Además, de comparar que se ha investigado al respecto, que aspectos se han considerado y que medidas se han implementado para reducirlos.

## 2. MARCO REFERENCIAL

### MÉTODO

El presente trabajo, comprende una revisión sistemática cualitativa, donde se indaga, recolecta, analiza e interpreta información de diferentes estudios realizados con el objetivo de identificar los impactos ambientales de mayor importancia y evaluación en la producción de café pergamino seco generados en cada uno de los procesos mencionados anteriormente, desde la germinación de la semilla hasta el beneficio y secado del grano.

En términos generales se seleccionaron y valoraron diferentes estudios primarios como

unidades de análisis teniendo en cuenta ciertas particularidades como resumen, justificación, objetivos, criterios de elegibilidad, fuentes de información, estrategia de búsqueda, proceso de selección de los estudios, extracción de datos, entre otros. En términos generales este estudio se realizó siguiendo las siguientes etapas:

- Etapa 1. Pregunta de investigación
- Etapa 2. Criterios de elegibilidad
- Etapa 3. Estrategia de búsqueda
- Etapa 4. Selección de los estudios
- Etapa 5. Extracción de datos y síntesis

### **Pregunta de investigación**

En primer lugar, de acuerdo con el contenido y el título del presente trabajo, se expuso la siguiente pregunta: ¿Qué resultados se encuentran documentados en la Literatura con respecto a la evaluación de los impactos ambientales negativos generados en las actividades o procesos de producción de café pergamino seco-CPS?

### **Criterios de elegibilidad**

La muestra contemplo estudios publicados potencialmente relevantes a nivel mundial, nacional, en el departamento de Santander y en el municipio del Socorro, por lo cual, a continuación, se indican los criterios de elección: Estudios aportados por instituciones educativas, estudios empíricos, cuantitativos o cualitativos, en el idioma español, publicados en los últimos quince años (2007 a 2022). Los artículos fueron relativos a la identificación de los impactos ambientales en todas las etapas de producción del grano desde la semilla hasta la obtención del café pergamino seco, incluyendo germinación, almacigo, siembra, mantenimiento, beneficio y secado. Además, se tuvieron en cuenta artículos donde se ha considerado únicamente una etapa del proceso de producción.

De la misma manera, se propusieron como criterios de excepción: artículos fuera del periodo de tiempo determinado.

Posteriormente, los datos más relevantes de cada publicación fueron extraídos y se realizó un

análisis mediante un cuadro resumen en una base de datos en Excel.

### **Estrategia de búsqueda**

Se realizó una búsqueda entre el mes de octubre y noviembre de 2022, empleando las bases de datos Scopus, Google Académico, Scielo, Dialnet, Scielo donde se realizó la búsqueda de artículos potencialmente relevantes y relacionados al tema empleando palabras clave como: Producción, café, impactos ambientales, Germinación, Almacigo, herbicidas, plaguicidas, erosión, Beneficio, subproductos, flora, fauna, secado. Además, se utilizaron los límites de tiempo 2007-2022.

### **Selección de los estudios**

En primera medida, los estudios se recolectaron tomando como referencia un orden Nacional, regional y local. Se tuvo en cuenta información aportada por estudios realizados en instituciones educativas como la Universidad Libre, estudios de desarrollo científico proporcionados por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ). Posteriormente, se realizó una revisión de los títulos y resúmenes de cada estudio. Para terminar, se adelantó la revisión sistemática de los estudios teniendo en cuenta la definición de los criterios de inclusión y exclusión con el fin de realizar la selección de manera uniforme.

### **Extracción de datos y síntesis**

Una vez seleccionadas las publicaciones, se procedió a leer e interpretar su contenido, la información fue extraída metódicamente, para la revisión, interpretación y resumen de la información se empleó una tabla incluyendo los siguientes campos: fuente, objetivo, etapa del cultivo de café analizados (germinador, almacigo, siembra, mantenimiento, beneficio y secado), componentes analizados, aspectos ambientales, impactos ambientales, medidas de manejo y por último se realizó un análisis de los resultados obtenidos en cada publicación.

#### 4. RESULTADOS

De acuerdo con la literatura encontrada Global, Nacional, regional y local, una parte de los estudios están centrados en los impactos

ambientales generados por los subproductos (mucilago y pulpa) obtenidos en la etapa del beneficio del café en las actividades de despulpado, lavado del fruto y fermentación, debido a la alta carga contaminante que contienen, por tanto, la importancia en términos ambientales de este proceso que generalmente causan la contaminación de los recursos agua y suelo, por otra parte, en el proceso de siembra se consideran diferentes aspectos ambientales relevantes como es el uso de fertilizantes nitrogenados y el uso de plaguicidas y herbicidas, por otra parte, se encuentran una de las actividades que favorecen la pérdida de fauna como es la deforestación y el monocultivo sin sombra, para lo cual diferentes autores coinciden

que los sistemas de producción cafetera se deben establecer bajo sombra de manera que se permita el refugio de diferentes especies de fauna, otros aspectos ambientales poco considerados en los estudios son el consumo de energía y combustibles en el proceso de beneficio y secado del café los cuales aportan a las emisiones atmosféricas. La mayor parte de los estudios coinciden que los impactos de mayor importancia se centran en el beneficio del café y en el proceso de fertilización, control de arvenses, plagas y enfermedades.

Por lo anterior, a continuación, se presenta un cuadro resumen de los diferentes estudios que se han desarrollado con respecto a los procesos de siembra, y beneficio; donde se resalta los diferentes aspectos e impactos ambientales identificados, los componentes del medio afectados y las medidas de manejo correspondientes que se han aplicado para estos casos.

Tabla 1. Resumen Impactos Ambientales generados en la producción de café, proceso de siembra

Fuente	Componentes analizados	Aspectos ambientales	Impactos Ambientales	Manejo
(Sánchez et al., 2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Suelo</li> <li>▪ Biodiversidad (flora y fauna)</li> <li>▪ Paisaje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Cultivo sin sombra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Degradación de la cobertura vegetal</li> <li>▪Reducción de materia orgánica del suelo</li> <li>▪Reducción del número de especies animales y vegetales nativos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Sistema agroforestales</li> <li>▪Cultivos bajo sombra</li> </ul>
(Guhl, 2009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Paisaje</li> <li>▪Biodiversidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Baja diversidad de especies de sombrero.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Alteración del hábitat de muchos organismos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Cultivos bajo sombra</li> </ul>
(CASTILLO, s. f.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Salud humana</li> <li>▪Ecosistema</li> <li>▪ Agua</li> <li>▪Suelo</li> <li>▪Aire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Uso de ciproconazol (usado para el control de roya)</li> <li>▪Uso de fertilizantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Deterioro de los recursos naturales</li> <li>▪Eutrofización</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Manejo biológico</li> <li>▪ Uso de abonos orgánicos</li> </ul>
(Macip-Ríos et al., 2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Flora</li> <li>▪Fauna</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Siembra de cafetales bajo sombra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Conservación y desarrollo de hábitat de anfibios y reptiles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Cafetales de sombra diversificados</li> <li>▪Presencia de Hojarasca</li> </ul>

Fuente	Componentes analizados	Aspectos ambientales	Impactos Ambientales	Manejo
(Camacho et al., 2018)	Aire	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fertilización nitrogenada</li> <li>▪ Uso de combustibles fósiles</li> <li>▪ Control fitosanitario</li> <li>▪ Consumo de energía</li> <li>▪ Fijación o remoción de Carbono</li> </ul>	Gases de efecto invernadero	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aplicación de dosis apropiada de fertilizante</li> <li>▪ Pago por servicios ambientales</li> </ul>

Tabla 2. Resumen Impactos Ambientales generados en la producción de café, proceso de beneficio

Fuente	Etapas del cultivo de café analizados	Componentes analizados	Aspectos ambientales	Impactos Ambientales	Manejo
(Ayala López, 2021)	Beneficio del café	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Salud Pública</li> <li>▪ Suelo</li> <li>▪ Componente biótico (flora y fauna)</li> <li>▪ Agua</li> </ul>	Generación del mucilago y pulpa del café	Contaminación del agua.	Compostaje
(Verdugo Ojeda, 2020)	Beneficio del café (subproductos mucilago, café)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agua</li> <li>▪ Suelo</li> </ul>	Subproductos: pulpa y mucilago,	El 20% realiza una disposición inadecuada de estos subproductos.	Compostaje
(Chaparro & Buenahora, 2013)	Beneficio del café	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agua</li> <li>▪ Suelo</li> </ul>	Generación de subproductos	Contaminación del agua	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Compostaje</li> <li>▪ Empleo de la tecnología Becolsub</li> </ul>
(Gómez-Anaya et al., 2017)	Beneficio del café	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agua</li> <li>▪ Flora y fauna acuática</li> <li>▪ Vegetación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Uso de pesticidas</li> <li>▪ Generación de aguas residuales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eutrofización</li> <li>▪ Cambios en los ensamblajes de algas</li> </ul>	No disponible
(Valencia & Franco, s. f.)	Beneficio del café	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agua</li> <li>▪ Suelo</li> </ul>	Generación de mucilago y pulpa	Contaminación del agua	Biocombustibles (Bioetanol, biogás)
(Torres Mejía, 2020)	Beneficio	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agua</li> <li>▪ Aire</li> <li>▪ Fauna</li> <li>▪ Flora</li> </ul>	Generación de mucilago y pulpa	Contaminación del agua	Producción de bioetanol (cafenol)
(Leyva Valencia & )	Beneficio	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suelo</li> <li>▪ Agua</li> <li>▪ Aire</li> </ul>	Generación de subproductos	Contaminación de suelo, aguas subterráneas y superficiales	Compostaje

Fuente	Etapas del cultivo de café analizadas	Componentes analizados	Aspectos ambientales	Impactos Ambientales	Manejo
--------	---------------------------------------	------------------------	----------------------	----------------------	--------

Livias Ostos, 2019)

Tabla 3. Resumen Impactos Ambientales generados en la producción de café, proceso de siembra y beneficio

Fuente	Etapas del cultivo de café analizadas	Componentes analizados	Aspectos ambientales	Impactos Ambientales	Manejo
(Clavijo Ortiz, 2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Almacigo</li> <li>▪ Siembra (trazado y ahoyado)</li> <li>▪ Mantenimiento (Nutrición, Renovación, Manejo de plagas y enfermedades)</li> <li>▪ Beneficio</li> <li>▪ Secado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agua</li> <li>▪ Aire</li> <li>▪ Suelo</li> <li>▪ Flora y fauna</li> <li>▪ Aspectos humanos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Generación de residuos sólidos (pulpa) y líquidos (mucilago)</li> <li>▪ consumo de agua,.</li> <li>▪ Nutrición del cultivo: uso de fertilizantes químicos</li> <li>▪ Almacigo: uso de bolsas plásticas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Contaminación del agua</li> <li>▪ Agotamiento de los recursos naturales</li> <li>▪ Contaminación del agua y suelo</li> <li>▪ Agotamiento de los recursos naturales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Compostaje</li> <li>▪ Uso tecnología Becolsub</li> </ul>
(Salazar Echeverry, 2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Siembra</li> <li>▪ Mantenimiento</li> <li>▪ Beneficio</li> <li>▪ Secado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suelo</li> <li>▪ Flora</li> <li>▪ Fauna</li> <li>▪ Aire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alto consumo de agua en el proceso de beneficio del café</li> <li>▪ Generación de subproductos mucilago y pulpa</li> <li>▪ Quema y deforestación</li> <li>▪ Uso de agroquímicos para manejo de plagas y enfermedades</li> <li>▪ Uso de fertilizantes</li> <li>▪ Consumo de energía</li> <li>▪ Emisiones atmosféricas por empleo de secado mecánico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agotamiento de los recursos naturales</li> <li>▪ Contaminación del agua</li> <li>▪ Disminución de la conservación del suelo</li> <li>▪ Afectación de la calidad del aire</li> </ul>	No disponible
	Beneficio	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agua</li> <li>▪ Suelo</li> <li>▪ Aire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cultivo sin sombra</li> <li>▪ Uso de agroquímicos</li> <li>▪ Consumo elevado de agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Afectación de la salud humana</li> <li>▪ Alteración de la calidad del suelo</li> <li>▪ Alteración de la calidad del agua (Aumento considerable en la demanda biológica de oxígeno, la carga de sólidos totales, incremento de la temperatura del agua)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cultivo bajo sombra</li> <li>▪ Control biológico</li> </ul>
(Sotto Rodriguez et al., 2020)					

Impactos ambientales generados en la producción de café pergamino seco

Fuente	Etapas del cultivo de café analizadas	Componentes analizados	Aspectos ambientales	Impactos Ambientales	Manejo
				<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Generación de malos olores por aguas mieles.</li> </ul>	
(Wilches Cifuentes, 2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Germinador</li> <li>▪ Almacigo</li> <li>▪ Siembra</li> <li>▪ Mantenimiento</li> <li>▪ Beneficio</li> <li>▪ Transporte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aire</li> <li>▪ Suelo</li> <li>▪ Agua</li> <li>▪ Salud humana</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Consumo de agua en los procesos de siembra y beneficio</li> <li>▪ Uso de agroquímicos para fertilización y control fitosanitario en la siembra y mantenimiento</li> <li>▪ Inadecuada disposición de residuos sólidos</li> <li>▪ Consumo de combustible usado en los equipos de poda, automotores y transporte</li> <li>▪ Generación de vertimientos de aguas residuales</li> <li>▪ Emisiones de CO<sub>2</sub> por el consumo de energía eléctrica en el proceso de beneficio</li> <li>▪ Quema de residuos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Contaminación del agua</li> <li>▪ Agotamiento de los recursos naturales</li> <li>▪ Contaminación del agua y suelo</li> <li>▪ Agotamiento de los recursos naturales.</li> </ul>	
(Díaz et al., s. f.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Siembra</li> <li>▪ Beneficio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agua</li> <li>▪ Suelo</li> <li>▪ Salud humana</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Deforestación</li> <li>▪ Monocultivo</li> <li>▪ Uso de pesticidas y fertilizantes</li> <li>▪ Generación de subproductos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pérdida de biodiversidad</li> <li>▪ Afectación de la salud humana</li> <li>▪ Erosión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sistema agroforestales</li> <li>▪ Beneficio ecológico</li> <li>▪ Recirculación del agua en el propio beneficio</li> <li>▪ Control legal por la Autoridad</li> </ul>
(Torres Mejía, 2011)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Beneficio</li> <li>▪ Siembra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agua</li> <li>▪ Aire</li> <li>▪ Fauna</li> <li>▪ Flora</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Generación de mucilago y pulpa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Contaminación de los recursos naturales</li> <li>▪ Calentamiento global</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Producción de bioetanol (cafenol)</li> <li>▪ Biogás</li> <li>▪ Bioabono</li> <li>▪ Sistemas agroforestales para captura de</li> </ul>

Fuente	Etapas del cultivo de café analizadas	Componentes analizados	Aspectos ambientales	Impactos Ambientales	Manejo
					carbono en cafetales
(Trujillo, s. f.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Beneficio</li> <li>▪Siembra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Recurso hídrico</li> <li>▪Aire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Generación de residuos</li> <li>▪Uso de agroquímicos</li> <li>▪Deforestación</li> <li>▪Monocultivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Afectación calidad del agua</li> <li>▪Afectación de la salud humana</li> <li>▪Afectación calidad del aire</li> <li>▪Erosión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Tratamiento de aguas</li> <li>▪Aplicación normativas</li> <li>▪ Sistemas agroforestales</li> </ul>

En el estudio realizado por Clavijo, (2018), se analizaron diferentes procesos para la producción de café como: almácigo, siembra (trazado y ahoyado), mantenimiento (incluye nutrición, manejo y control de plagas y enfermedades y renovación del cultivo por el método zoca), la etapa del beneficio de café la cual es la más significativa y por último el secado del grano. Encontrándose que los impactos ambientales presentados en los procesos de producción de café con mayor significancia se evidencian durante el beneficio del café cuando se emplea el beneficio tradicional debido al aumento en la generación de volúmenes de aguas residual, causando la contaminación de fuentes hídricas. Otro aspecto ambiental importante encontrado en este estudio, es el uso de fertilizantes químicos para el mantenimiento del cultivo y el uso de plaguicidas para el control fitosanitario los cuales afectan los diferentes ecosistemas.

Por otra parte, en el estudio se consideraron los componentes aire, agua, suelo, procesos, flora, fauna y aspectos humanos, los cuales se ven afectados por la actividad cafetera. Dado lo anterior este estudio comprendió todas las etapas de producción de café excepto la etapa de germinación donde generalmente se emplean fungicidas para la desinfección del sustrato.

Verdugo (2020) realizó un estudio en el que se evidencia que, en el sistema de producción

cafetero, con respecto al destino de los subproductos generados en el proceso de beneficio, el 80% realizan un adecuado tratamiento y aprovechamiento de estos residuos, principalmente a través del proceso de compostaje y el 20% realiza una disposición inadecuada de estos subproductos arrojándolos directamente al suelo o a las fuentes hídricas.

Ayala resalta como principal aspecto ambiental la generación del mucilago y pupa del café en la etapa del beneficio del café (despulpado, lavado y fermentación), generando impacto negativo como la contaminación del agua.

Con respecto a la fase de beneficio húmedo del café, Chaparro et al, realizaron un estudio, obteniendo como resultado que el 54,2% emplean la tecnología Becolsub, y el 45,8% restante aún maneja el beneficio tradicional, generando con esto aumento en el volumen de agua residual y por consiguiente la contaminación del recurso hídrico, causando un impacto crítico al ecosistema. Por otra parte, La pulpa del café es aprovechada en el 83,3% de las fincas como compostaje para posteriormente ser incorporado en sus cultivos, a diferencia del otro 16,7% de los caficultores que no reutiliza la pulpa disponiéndola directamente al suelo sin tratamiento previo.

Rojas (2012) menciona que un sistema intensivo de producción de café (monocultivo sin sombra), el cual emplea mayor cantidad de recursos y agroquímicos, causa un impacto directo a los ecosistemas, porque degrada gradualmente la vegetación y en consecuencia decrece la cantidad de especies de fauna y flora nativas del área de siembra. Por tal razón, es recomendable establecer un sistema bajo sombra con diferentes especies forestales y otro tipo de cultivos intercalados favoreciendo el cuidado de la biodiversidad.

Guhl (2009) generaliza que cuando un sistema productivo de café presenta menor diversidad de especies de sombrero, esto puede afectar significativamente la disminución de biodiversidad, impactando muchos organismos por la pérdida de condiciones de un hábitat favorable. Cuando desaparece la sombra, se irrumpe el hábitat y, por consiguiente, muchos de los organismos característicos del lugar se agotan. Por tal motivo, la mayoría de los caficultores a través del tiempo conservan la práctica de establecer diferentes variedades de sombra (guamo, carbonero, búcaro entre otros) lo cual no solo favorece el cultivo, sino que además estaría protegiendo el recurso fauna y suelo; además en algunos casos los agricultores emplean diferentes métodos para la siembra de otros cultivos como plátano, yuca, maíz, cítricos de manera simultánea con el cultivo de café, convirtiendo en un sistema agroforestal favorable para el medio ambiente.

Zapata (2019) identifica como impactos la alteración directa en los recursos aire, agua y suelo, cuando se emplea plaguicidas uno de ellos conocido como ciproconazol (usado para el control de roya), la cual es una sustancia con potencial de acumulación, presenta características de toxicidad en peces, crustáceos, anfibios, aves, insectos, lombrices de tierra y algas, por otra parte, el incremento de nutrientes en el agua generados cuando se usan fertilizantes comerciales, además, ocasiona afectación de la calidad del agua por el efecto conocido como eutrofización; estas determinantes permiten deducir que las etapas de siembra y cosecha, son las que generan los impactos de mayor importancia en la salud humana y presión sobre los recursos aire y suelo.

Salazar (2009) comprendido un diagnóstico de los diferentes aspectos en la producción de café que pueden ocasionar impactos ambientales, como la quema y deforestación que pueden afectar la conservación del suelo y el ecosistema terrestre, el manejo de plagas y enfermedades debido al uso de productos químicos, el consumo de agua en la etapa de beneficio del café, el manejo de los subproductos como el mucilago y pulpa, se identificó el tipo de secado debido a las emisiones atmosféricas que pueden generar los gases de combustión cuando se emplea secado mecánico. Para lo cual, se obtuvo como resultados un alto impacto en el uso irracional del agua y el manejo de aguas residuales; otros aspectos como cuidado de flora y la fauna; empleo de agroquímicos en la nutrición y control fitosanitario; prácticas de conservación de suelos; uso de fertilizantes; manejo de residuos y ahorro de energía fueron clasificados como impacto medio, pero, por otra parte, se destacan impactos de carácter positivo como realizar actividades para la protección de suelos tales como siembra a través de la pendiente, no quemar residuos, establecimiento de coberturas nobles, entre otros; por otra parte, se encuentra el uso de fuentes de energía alternativas como energía solar para el secado del grano o empleo de cisco a cambio de combustibles fósiles para el funcionamiento de equipos de secado.

Fernández, identifico los principales impactos negativos en los procesos de implementación del cultivo de café, por una parte, se identificó que los caficultores del sector no emplean el cultivo bajo sombra afectando los diferentes ecosistemas, por otra parte, el uso de agroquímicos genera consecuencias a la salud humana, así como afectación a los índices de calidad del suelo y del recurso hídrico y finalmente un alto consumo de agua, usado en el despulpado, lavado y fermentación del grano, generando un aumento significativo en diferentes parámetros de calidad del agua debido al incremento de la carga contaminante como: demanda biológica de oxígeno, sólidos totales, temperatura y generación de olores ofensivos.

Los impactos ambientales que produce en el sector cafetero, según Wilches (2014), están relacionados al consumo de agua en las etapas de siembra (riego) y beneficio (despulpado del fruto), el uso de agroquímicos para la fertilización, prevención y control de plagas y enfermedades en la siembra y sostenimiento del cultivo, la indebida disposición y quema de residuos sólidos generados (bolsas para almacigo, envases de plaguicidas y herbicidas), el uso de combustible en equipos (guadañas, podadoras entre otras), la generación de descargas contaminantes por residuos líquidos en el proceso de beneficio, la energía eléctrica empleada en los procesos de beneficio y secado; .Por tal motivo, los procesos que generan un alto impacto ambiental pertenecen a: siembra, mantenimiento o sostenimiento del cultivo y beneficio, otro proceso adicional que reporta resultados es el transporte que, a pesar de ser un proceso complementario de la cadena productiva, es considerado importante debido al consumo de combustibles por su aporte a la huella de carbono.

Polo (2013) sugiere que uno de los más relevantes impactos negativos es el uso de agroquímicos, dada las composiciones y propiedades físicas y químicas que presentan la mayoría de estos productos, intolerables con el medio ambiente, estas sustancias interactúan influyendo su dinámica en el ambiente generando un problema en el equilibrio ecológico y por consiguiente un impacto paulatino significativo, sobre el recurso suelo, agua, debido a los vertimientos líquidos contaminantes, afectando la flora y fauna; y en el aire, por emisiones atmosféricas. Además de la afectación a la salud humana cuando no se tienen las adecuadas medidas de protección personal.

Un resultado de investigación del centro Nacional de Investigaciones del Café (CENICAFE), que evalúa el aprovechamiento del mucilago para la obtención de etanol, debido a que este, contiene grandes propiedades como alto contenido en azúcares, del cual se han realizado experimentos por fermentación del mismo. Este estudio representa, una alternativa de aprovechamiento de

este subproducto contribuyendo a la disminución del impacto ambiental.

Torres, menciona mediante un modelo que contempla una alternativa de manejo y aprovechamiento de los subproductos del café (mucilago, pulpa, pergamino) proporcionando un valor agregado a través de la generación de energía limpia, como bioetanol, biogás, energía de combustión, Bioabono a través de compostaje, y la valoración de fijación de carbono en cafetales; debido a que en la actualidad las fincas que desarrollan la actividad cafetera y que cuentan con un sello de certificación ambiental no contemplan estrategias como la producción de energía empleando los subproductos de café. Por tal razón es de vital importancia que los caficultores conozcan, reciban apoyo por parte de entidades e implementen diferentes estrategias para el manejo de estos residuos que permitan reducir la presión sobre los recursos naturales.

La mayoría de productores no realizan un tratamiento adecuado a los subproductos generados en el beneficio del café y estos terminan afectando los diferentes componentes del medio ambiente, estos subproductos pueden ser utilizados de manera que se les dé un valor agregado; una alternativa de aprovechamiento de estos residuos es la producción de bioetanol (cafetanol) a partir del mucilago, miel y la pulpa del café, los cuales por su composición y sus características brindarían una gran oportunidad de incrementar el potencial nacional en la producción de cafetanol con un valor de 11.301.773,3 Galus/año, por otra parte, la pulpa puede ser empleada para la obtención de biogás, para este caso, se estaría hablando de que sería posible obtener 243,31 TJ/año de biogás, el cual puede ser utilizado en las fincas cafeteras y finalmente a través del proceso de compostaje se sacaría el último provecho brindando utilidad a la pulpa sobrante, logrando Bioabono para lo cual se podrían generar aproximadamente 157700 Toneladas. Lo cual representa una oportunidad de sustituir los abonos químicos en la producción, permitiendo disminuir costos de producción y la huella de carbono.

De este modo, Torres dice, sería de gran utilidad aprovechar la energía que contienen los subproductos del café, para lo cual, representaría la energía equivalente a 300.718,37 TEP (2.166.856,3 barriles de petróleo) de energía primaria, lo cual permitirá reducir las importaciones y el uso de combustibles fósiles, por consiguiente, se disminuirían las emisiones de CO<sub>2</sub> causante del calentamiento global, contribuyendo a que el sector cafetero sea sostenible.

De igual manera Torres considera que con respecto a la fijación de emisiones de carbono de los cafetales se ha evidenciado que en Honduras presentemente los cultivos de café han absorbido 22.393.615 toneladas de carbono como evaluación inicial, de igual manera estos cultivos capturan 1.808.301 Ton. C/ha-año, lo que podría contemplarse la posibilidad de que sea vendido en el mercado de servicios ambientales a otros países, siendo una estrategia para que sea un sector que propone objetivos de conservación. Con respecto a esta idea, Colombia representaría una gran oferta de servicios ambientales y podría contemplarse esta posibilidad por la gran cantidad de plantaciones de café presentes en el país actualmente.

### DISCUSIÓN

Considerando los estudios revisados, se puede deducir que los diferentes procesos en la producción del café son susceptibles de generar impactos significativos al medio ambiente, puesto que se encuentran diferentes aspectos ambientales como consumo de agua, consumo de energía, generación de residuos sólidos y aguas residuales, empleo de insumos contaminantes, incrementando la posibilidad de afectación de los recursos naturales agua, suelo, flora y fauna.

Considerando la literatura revisada, la etapa del beneficio húmedo del café, en su fase de despulpado y lavado es el proceso con mayor caso de estudios alcanzando un 30%, debido al alto impacto que ocasiona los subproductos generados caracterizados por su alta carga contaminante los cuales contaminan fuentes de agua y el suelo.

La mayor parte de los estudios han planteado en el proceso de beneficio húmedo de café aprovechamiento de residuos (compostaje) y estrategias tecnológicas para la disminución de la contaminación del agua, de manera que se reduzcan los impactos en esta etapa. Sin embargo, se referencian pocos estudios donde se hayan evaluado otras alternativas de aprovechamiento como la obtención de Bioetanol (Cafenol) a partir del mucilago y la pulpa del café permitiendo reducir las emisiones atmosféricas por el uso de combustibles fósiles.

Es importante considerar, que al no adoptar métodos tecnológicos ambientalistas y prácticas adecuadas se incrementa la posibilidad de generar impactos ambientales negativos, haciendo del sector cafetero un problema serio de contaminación, sin embargo, en la actualidad se ha brindado mayor importancia al cuidado del medio ambiente, optimizando el uso de los recursos en cada una de las actividades de producción de café, creando y aplicando técnicas ambientales que preserven el medio ambiente sin dejar de lado una buena producción, por lo que diferentes trabajos han buscado que los caficultores sean conscientes de implementar prácticas de desarrollo sostenible, y así poder minimizar los impactos adversos a los recursos naturales.

Por otra parte, hay que considerar que los caficultores deben adquirir un compromiso de desarrollar esta actividad con responsabilidad ambiental, con el apoyo de las diferentes entidades como ECOM, Rainforest Alliance, CAFÉ practices, FLO y/o Cooperativismo rural entre otras, con el fin de generar prácticas amigables con el ambiente buscando que el sector cafetero sea sostenible, disminuyendo la generación de impactos negativos.

Por otra parte, debido a que se han evidenciado pocas iniciativas y pocos resultados de investigación con respecto a otros impactos ambientales, analizando el caso en particular del impacto ocasionado por el uso de bolsas de polietileno para lo almárgos de café, las cuales

generalmente se convierten en un problema de residuos; sería importante indagar otras alternativas para su reemplazo empleando materiales biodegradables apoyándose en estudios realizados, brindando mayor importancia a este impacto ambiental.

De igual manera, otro caso en particular es la captura de carbono en las plantaciones de café, para lo cual sería conveniente realizar estudios donde se evalué la captura de emisiones de Carbono, aplicando ideas innovadoras que traerían beneficios a las comunidades cafeteras y aportarían un impacto positivo para el cuidado del medio ambiente.

### 5. CONCLUSIONES

Los aspectos ambientales identificados en cada uno de los estudios revisados representan oportunidades de mejora para el sector caficultor a nivel global y en Colombia, debido a que no existe una diferencia marcada entre los sistemas de producción en casos de estudio se podría generalizar, por eso, esta revisión proporciona un marco de referencia que ayuda a comprender cuales son los aspectos e impactos ambientales más significativos de la producción cafetera, y las diferentes medidas de manejo que se han implementado para reducirlos.

Basado en la presente revisión sistemática se deduce que los procesos en el sistema de producción de café que generan mayor impacto ambiental corresponden a: siembra, mantenimiento del cultivo y beneficio.

Analizando los impactos negativos en el componente ambiental generados por la producción de café, de acuerdo a lo manifestado anteriormente, se puede evidenciar que con respecto a los subproductos mucilago y pulpa generados en el proceso del beneficio del café, todavía no se realiza un aprovechamiento eficaz, generalmente son usados como fuentes de obtención de abono orgánico, sin embargo aunque ya se tienen estudios que pueden ser fuente para la obtención de biocombustibles no se encontraron muchos casos donde se haya implementado esta alternativa.

Se puede decir que los sistemas de producción de café también pueden aportar un impacto positivo

al medio ambiente mediante la implementación de sistemas agroforestales, proporcionando un hábitat favorable para las distintas especies de fauna específicas de cada lugar.

### 6. BIBLIOGRAFÍA

- Ayala López, L. C. (2021). Impacto ambiental generado por los cultivos de café de la finca santa rosa de El Socorro Santander.
- Camacho, W. A., Hernández, J. J. A., Herrera, N. M. R., Becerra, A. M. R., Suarez, H. J. P., Andrade, J. V., Cano, M. A. V., Cortes, Y. P. M., & Chavez, J. F. C. (2018). Determinación de la huella de carbono en el sistema de producción de café pergamino seco, de cuatro municipios del sur del departamento del Huila (Colombia). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(2), 109-120.
- CASTILLO, I. E. C. V. (s. f.). Evaluación de la sostenibilidad de la cadena de suministro agroindustrial de café en dos Municipios del Oriente de Cundinamarca.
- Chaparro, S. X. D., & Buenahora, E. R. V. (2013). Identificación del manejo de subproductos del beneficio del café en las fincas localizadas en la parte alta de la microcuenca La Sancoeta, Vereda Alto de Reinas, Socorro-Santander. *El Centauro*, 5(8), 19-30.
- Clavijo Ortiz, K. L. (2018). Evaluación de los impactos ambientales generados en los procesos de producción del café en las fincas campo alegre, el clavelito y mi tesoro de la vereda alto de reinas y el triunfo de la vereda la culebra del municipio del Socorro Santander. <http://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/19999>.
- Díaz, D. N. P., Ramos, R. M. C., Leila, D., Abreu, R. C., & Gutiérrez, J. Á. V. (s. f.). Título: Impacto ambiental en el cultivo y procesamiento del café y su repercusión social. 22.

- Gómez-Anaya, J. A., Novelo-Gutiérrez, R., & Astudillo-Aldana, M. R. (2017). Efecto de las descargas domésticas y de beneficio de café sobre la calidad del agua y la diversidad de larvas de Odonata (Insecta) en un arroyo de bosque mesófilo de montaña en Veracruz, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 372-380.  
<https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.004>
- Guhl, A. (2009). Café, bosques y certificación agrícola en Aratoca, Santander. *Revista de estudios sociales*, 32, 114-125.
- Leyva Valencia, F. A., & Livias Ostos, M. (2019). Estrategia para minimizar el impacto ambiental del cultivo de café (*Coffea arabica* L, var. Catimor) mediante el análisis de su ciclo de vida – Huánuco 2019. Repositorio Institucional - UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/50988>
- Macip-Ríos, R., López-Alcaide, S., & Muñoz-Alonso, A. (2013). Abundancia, uso de hábitat, microhábitat y hora de actividad de *Ameiva undulata* (Squamata: Teiidae) en un paisaje fragmentado del Soconusco chiapaneco. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84(2), 622-629.  
<https://doi.org/10.7550/rmb.31752>
- Polo Murgueitio, Y. M. (2013). Análisis de factibilidad técnica, ambiental y financiera para la producción y comercialización de café sostenible por el grupo asociativo Robles del Macizo-corregimiento de Bruselas (municipio de Pitalito, Huila).
- Salazar Echeverry, H. M. (2013). Diagnóstico de la sostenibilidad ambiental de la producción de café en Colombia. <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/1084>
- Sánchez, Á. R., Ulloa, K. H., & Marques, R. A. (2012). El impacto de la producción de café sobre la biodiversidad, la transformación del paisaje y las especies exóticas invasoras. *Ambiente y Desarrollo*, 16(30), 93-104.
- Sotto Rodríguez, K. D., Vargas Marín, L. A., & Fernández Cortés, Y. (2020). Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados.
- Torres Mejía, F. (2011). Modelo de Manejo y Proceso de los subproductos de la Industria Cafetalera de Honduras para la producción de Energía Renovable Management and Process Model of the by-products of the Coffee Industry of Honduras for the production of Renewable Energy. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12178.58563>
- Torres Mejía, F. (2020). Evaluación del Potencial Energético de los Desechos Generados en el Procesamiento del Café en Honduras. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10629.37602>.
- Trujillo, E. Y. U. (s. f.). IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES RELACIONADOS CON EL PROCESO DE BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ EN LA VEREDA DE TRES ESQUINAS - HUILA - COLOMBIA.
- Valencia, N. R., & Franco, D. A. Z. (s. f.). LOS SUBPRODUCTOS DEL CAFÉ: FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE.
- Verdugo Ojeda, Y. (2020). Manejo de los subproductos del beneficio de café en diez fincas de la vereda alto de reinas, el socorro-Santander.
- Wilches Cifuentes, M. (2014). Aplicación de análisis del ciclo de vida en la cadena agrícola del café para la generación de lineamientos de ventaja competitiva. Estudio de caso. instname:Universidad Piloto de Colombia. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/741>

## TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN RELLENOS SANITARIOS

Carlos Jeffrey Bastos Daza <sup>1, 1</sup>*Ingeniero Ambiental, Universidad Francisco de Paula Santander,*  
[jeffreymbastos777@gmail.com](mailto:jeffreymbastos777@gmail.com), [carlosjbastosd@unilibre.edu.co](mailto:carlosjbastosd@unilibre.edu.co)

ISSN: 2590-6704

### RESUMEN

El lixiviado se produce cuando la humedad ingresa a la basura en un relleno sanitario, extrae los contaminantes a la fase líquida y produce un contenido de humedad lo suficientemente alto como para iniciar el movimiento del líquido, se caracteriza por una alta demanda química y biológica de oxígeno y, por lo general, consiste en sustancias indeseables como contaminantes orgánicos e inorgánicos. El lixiviado está muy contaminado y debe tratarse para evitar la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, estos lixiviados de los rellenos sanitarios pueden diferir según el contenido y la edad del contenido del relleno sanitario, el procedimiento de degradación, el clima y las condiciones hidrológicas. Es común realizar un tratamiento de los lixiviados mediante un sistema de tratamiento combinado el cual consta de técnicas físicas, químicas y como también biológicas.

**Palabras Clave:** *Lixiviado, relleno sanitario, contaminación ambiental, agua superficial, agua subterránea.*

### ABSTRACT

Leachate occurs when moisture enters the garbage in a landfill, draws contaminants to the liquid phase and produces a moisture content high enough to initiate the movement of the liquid, it is characterized by a high

chemical and biological demand for oxygen and generally consists of undesirable substances such as organic and inorganic pollutants. Leachate is highly contaminated and must be treated to avoid contamination of surface and groundwater, these leachates from landfills may differ depending on the content and age of the landfill content, degradation procedure, climate, and hydrological conditions. It is common to treat leachates through a combined treatment system which consists of physical, chemical, and biological techniques.

**Keywords:** *Leached, landfill, environmental pollution, superficial water, underground water.*

### 1. INTRODUCCIÓN

A través de los años, se desechan grandes cantidades de residuos por el ser humano que son generados por sus acciones de vida cotidiana, desarrollo económico y la industria, es importante caracterizar la importancia de conocer y separar los residuos para facilitar el proceso de recolección y compactación realizado por las empresas prestadoras del servicio de aseo (Rondón Toro et al., 2016).

Por consiguiente, se resalta la disposición final siendo un elemento de la gestión integral de los residuos sólidos - GIRS, debido a que aquellos residuos que no se reutilizan

requieren de un lugar donde compactarlos de forma definitiva (Torres-Lozada et al., 2014).

Los vertederos han evolucionado a partir de rellenos sanitarios al aire libre hasta vertederos de alta tecnología donde, se vigilan las emisiones latentemente peligrosas para el medio ambiente (líquidas y gaseosas). Tanto en los botaderos a cielo abierto como en los primeros botaderos sanitarios no se controlaron las emisiones líquidas (los llamados lixiviados) y se vertieron en aguas superficiales o se filtraron a las capas inferiores del suelo y en muchos casos se contaminaron los acuíferos (Novelo et al., 2004). Los lixiviados son aquellos líquidos que tuvieron contacto con residuos del relleno sanitario y son producidos por la disolución de uno o más compuestos de residuos urbanos en contacto con el agua, otro origen se debe por la dinámica de descomposición de los residuos (Gelvez & Contreras, 2006).

El agua de infiltración puede finalmente ser retirada del vertedero para tratarla con métodos fisicoquímicos y biológicos y así impedir la contaminación de aguas subterráneas y aguas superficiales (Reinhart & Basel Al-Yousfi, 1996). Las posibilidades para su tratamiento incluyen la reutilización de lixiviados para conservar los niveles de humedad del relleno sanitario, al realizar el tratamiento en el sitio (aeróbico, anaeróbico o fisicoquímico), para así realizar una descarga a las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales o una combinación de los anteriores (Duggan, 2005).

Los procesos de coagulación-floculación y flotación tienen como finalidad eliminar las partículas suspendidas de la fase líquida; a valores bajos de pH remueven las partículas de menor tamaño que le confieren color al lixiviado. Los procesos de adsorción y de oxidación Fenton intensiva pueden eliminar tanto partículas suspendidas como disueltas (Méndez Novelo et al., 2009).

En el presente trabajo de investigación, se presenta una categorización de los distintos tipos de tratamiento de lixiviados en los rellenos sanitarios, su importancia y finalidades para contribuir con el mejoramiento y protección del medio ambiente y de los recursos naturales.

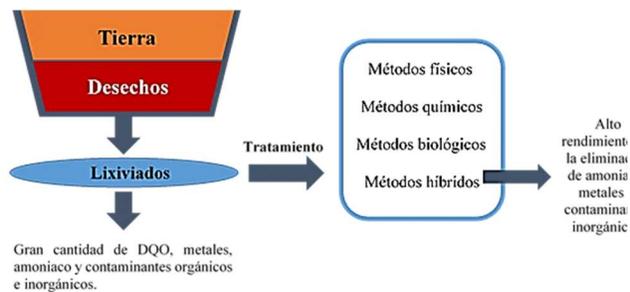
## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1 Características del lixiviado de relleno sanitario

El lixiviado de relleno sanitario conocido también como vertedero, es un líquido oscuro maloliente, el cual alberga grandes cantidades de materia orgánica y material inorgánico, incluso contiene diversos materiales orgánicos refractarios como compuestos aromáticos y humus; sales inorgánicas tales como nitrógeno amoniacal, carbonato y sulfato; e iones metálicos como cromo, plomo y cobre (Christensen et al., 2001).

Otras características que se deben tener en cuenta en los lixiviados, es la variación en la cantidad y calidad del agua residual de los distintos rellenos sanitarios, ya que la ubicación geográfica tiene un impacto significativo. Estas diferencias pueden estar sujetas a las distintas culturas y comportamientos arraigados de las regiones. Además, la calidad del lixiviado puede variar en el mismo lugar de origen en diferentes momentos, en donde pueden ser divididos en lixiviados tempranos (menores a cinco años), a mediano plazo (de 5 a 10 años) y antiguos (mayores de 10 años) (Baig et al., 1999).

**Figura 1.** Lixiviado de vertedero. Fuente: Elaboración propia



**Fuente:** Elaboración propia

La biodegradabilidad de las aguas residuales generalmente, se determina mediante el uso de varios ensayos a largo plazo no estandarizados de laboratorio o a escala piloto con lodos activados como fuente de microorganismos activos (Nyholm, 1991). La evaluación de la biodegradabilidad generalmente comienza con la determinación de la biodegradación fácil en condiciones ambientales comunes y se actualiza con la evaluación del potencial de biodegradación en la prueba de evaluación de la biodegradabilidad, inherente en condiciones óptimas (Nyholm, 1996).

## 2.2 Tratamiento de lixiviados de los rellenos sanitarios

Un manejo apropiado puede reducir la cantidad y calidad del lixiviado, pero no puede eliminarse por completo, por lo que el tratamiento y disposición de estos lixiviados representa uno de los mayores costos operativos del relleno sanitario debido a que el lixiviado, está compuesto por grandes cantidades de materia orgánica y nitrógeno amoniacal, y a fin de mejorar las técnicas de eliminación se han incluido el pretratamiento físico y químico, seguido de procesos bioquímicos aeróbicos y anaeróbicos, concluyendo con otros métodos físicos y químicos para el tratamiento final en profundidad (Martinez-Lopez et al., 2014).

La selección del método de tratamiento apropiado depende estrictamente de las características y composición del lixiviado. Por lo que, para un tratamiento biológico eficaz, se debe evaluar su biotratabilidad. En el caso de una baja eficiencia de tratamiento de la planta biológica, se debe acudir a la implementación de métodos combinados de tratamiento para así lograr una mayor eficiencia (Žgajnar Gotvajn & Pavko, 2015).

Las funciones principales del pretratamiento constan en la eliminación de los sólidos suspendidos, para así descomponer parte de la materia orgánica y el nitrógeno amoniacal, llevar a cabo una disminución de la toxicidad y optimizar eficientemente la biodegradabilidad del lixiviado. Lo anterior puede lograrse mediante la coagulación y separación el nitrógeno amoniacal del lixiviado. La función de la etapa bioquímica posterior es eliminar la materia orgánica biodegradable y el nitrógeno amoniacal (Giraldo, 2001).

Los métodos de tratamiento mencionados a continuación, se encuentran basados en la medición de parámetros resumidos, como la eliminación de DQO, metales, amoníaco, etc. Se recomienda una combinación de diferentes técnicas de para lograr la degradación y disminución de la carga contaminante de estos lixiviados (Lindgaard-Jørgensen & Nyholm, 1988).

### 2.2.1 Transferencia de Lixiviados: Recirculación y tratamiento combinado con aguas residuales urbanas

**Recirculación:** Consiste en canalizar y bombear el lixiviado para reintroducirlo en la masa de residuos. Esta elección es la más económica de las enseñadas, ya que simplemente se necesita instalar un sistema de bombeo, por lo que conlleva un bajo mantenimiento y bajos costos operativos (Luo et al., 2021).

La recirculación de lixiviados da como resultado un incremento en la cantidad de humedad en la masa de desechos, lo que a su vez induce un incremento en la tasa de producción de biogás. Así, se consigue una importante reducción de la DQO que se trasladará en la generación del lixiviado posterior (Xing et al., 2020). Sin embargo, una recirculación excesiva puede afectar de forma negativa la digestión anaeróbica de la masa de desechos. Además de mejorar la calidad del lixiviado, la recirculación hace que el tiempo necesario para la maduración de la masa residual se reduzca a 2 o 3 años (Sohoo et al., 2021).

**Tratamiento combinado con aguas residuales urbanas:** Consiste en la canalización y bombeo del lixiviado a la red de saneamiento para posteriormente ser tratada en una depuradora de aguas residuales urbanas. Esta técnica implica un costo y mantenimiento bajo, como también una baja dificultad operativa, ya que solo se debe instalar una red de bombeo y transporte hasta el punto de mezcla con aguas residuales urbanas y el pago de impuestos por vertido a la red pública de saneamiento (Lin & Chang, 2000).

La presencia en el lixiviado de compuestos inhibidores de baja biodegradabilidad y metales pesados puede reducir la eficiencia del tratamiento de EDAR y aumentar las concentraciones de contaminantes en el efluente. Como ventajas de esta gestión, destaca que no se requiere una adición extraordinaria de nutrientes en la EDAR, ya que el lixiviado aporta suficiente nitrógeno y las aguas residuales urbanas aportan suficiente fósforo para el correcto funcionamiento de los tratamientos biológicos de la planta (Pesci Pereira et al., 2018).

## 2.2.2 Biodegradación: Procesos anaerobios y aerobios

La eliminación de materia orgánica mediante un proceso de lodos activados, se considera la forma más eficaz y económica de lograr el resultado deseado. Los consumos bajos de energía durante el proceso anaeróbico combinado con la eficacia de la técnica aeróbica podrían minimizar considerablemente el daño ambiental ocasionado por el lixiviado (Sanguanpak et al., 2015). No obstante, a causa de la composición compleja de los lixiviados, se debe tener en cuenta que gran cantidad de materia orgánica permanecerá en el efluente final descargado después de estos tratamientos biológicos y esto obstaculiza el cumplimiento de los estándares regulatorios. Aún se requieren más desarrollo y métodos de eliminación más efectivos (Imai et al., 1995).

### 2.2.2.1 Proceso de lodos activados anaeróbicos

El proceso de lodos activados anaeróbicos para el tratamiento de lixiviados de vertederos puede incluir manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB), biorreactor de membrana anaeróbica (MBR) y reactor de manto de lodo granular expandido (EGSB). El proceso UASB da como resultado una alta eficiencia de eliminación y una gran carga volumétrica. Por lo tanto, este método se utiliza a menudo para tratar lixiviados con alto contenido orgánico (Bohdziewicz et al., 2008); Los MBR anaeróbicos contienen una alta concentración de lodos y la calidad del efluente de este proceso es buena para procesar el afluente que comprendía un 20% de lixiviados y un 80% de aguas residuales (Ağdağ & Sponza, 2005); El EGSB, un reactor anaeróbico de tercera generación, tiene la característica de una alta carga volumétrica, y una tasa de

eliminación de DQO del 85% al 90% (Liu et al., 2012).

### 2.2.2.2 Proceso de lodos activados aeróbicos

El proceso de lodos activados aeróbicos para el tratamiento de lixiviados incluye reactores de secuenciación por lotes (SBR), biorreactores de membrana aeróbica (MBR), el proceso A/O y reactores de biopelícula (Zolfaghari et al., 2016). Los SBR son la tecnología sobresaliente y comúnmente utilizada en el tratamiento de lixiviados de vertederos debido a su gran capacidad y estructura simple; Los MBR se utilizan, a menudo para tratar los lixiviados debido a su alta concentración de lodos y la buena calidad del agua efluente; El proceso A/O se usa a menudo para tratar lixiviados, debido a su fuerte remoción de nitrógeno, la tasa de reducción de DQO, también es muy buena cuando se utiliza A/O para procesar lixiviados de vertederos (Klimiuk & Kulikowska, 2006).

En la actualidad, el proceso de lodos activados aeróbicos, se utiliza para la eliminación del amonio en los lixiviados. Sin embargo, la eficiencia de la disminución de la DQO también es muy significativo. Una vez completado el tratamiento aeróbico del lixiviado, los organismos biológicos pueden eliminarse casi por completo. Como resultado, las amenazas al medio ambiente ocasionadas por los lixiviados de los rellenos presentan una disminución significativa (Lim et al., 2010).

### 2.3 Métodos Físicoquímicos: Oxidación química, adsorción, precipitación química, coagulación/floculación, y extracción con aire.

**Oxidación química:** Hay muchas sustancias químicas comunes que se utilizan como oxidantes. Estos incluyen cloro, permanganato

de potasio, peróxido de hidrógeno, hipoclorito de calcio y ozono. Cada uno de estos oxidantes químicos tienen sus propias ventajas y desventajas. Los procesos de oxidación eliminan los contaminantes mediante la oxidación directa e indirecta de la sustancia durante el tratamiento (Wu et al., 2004). En el proceso de oxidación directa, los contaminantes son adsorbidos sobre los oxidantes y destruidos por la reacción de transferencia de electrones de los oxidantes. Los mecanismos de eliminación debido a la oxidación indirecta de los oxidantes son producto de radicales libres intermedios como  $O_2$ ,  $OH$  y  $HO_2$  que están involucrados en la oxidación y degradación de contaminantes (Masten et al., 1996).

**Adsorción:** El proceso de adsorción utiliza el material o medio que tiene la capacidad de adsorber sustancias disueltas en agua en sus superficies porosas. Estos materiales se denominan adsorbentes y las sustancias adsorbidas se conocen como adsorbatos (Meier et al., 2002). Los mecanismos de adsorción generalmente se clasifican como adsorción física, quimisorción o adsorción electrostática. La adsorción física es estimulada por fuerzas moleculares débiles como las fuerzas de Van der Waals, mientras que la quimisorción involucra una reacción química para la formación de un enlace químico entre el adsorbato y la superficie del adsorbente (Bekbölet et al., 1996).

La adsorción electrostática implica la adsorción de iones a través de fuerzas Coulombic y normalmente se denomina intercambio iónico que elimina los iones de la fase acuosa mediante el intercambio de cationes o aniones entre los contaminantes y el medio de intercambio (Foul et al., 2009). Hay muchos factores que podrían afectar el proceso de adsorción del lixiviado, como las

propiedades químicas de los adsorbatos, las propiedades adsorbentes y las características del lixiviado. La presencia de ciertas sustancias en las aguas residuales adsorberá y afectará las capacidades de adsorción entre sí, especialmente en el lixiviado de vertederos que contiene una amplia gama de contaminantes (Kargi & Yunus Pamukoglu, 2003).

**Precipitación química:** El mecanismo de eliminación por precipitación química consiste en transformar los contaminantes del interior del lixiviado en formas sólidas que se pueden eliminar fácilmente del agua (Schulze-Rettmer, 1991). Este proceso es eficaz para eliminar muchos contaminantes junto con los procesos de coagulación con el uso de cal, alumbre, sulfato férrico y sulfato ferroso. El proceso de eliminación por precipitación depende, especialmente de la disolución de los contaminantes en el lixiviado. Por ejemplo, los metales pesados que existen en el lixiviado en forma de cationes pueden precipitar como formas sólidas de hidróxido y carbonato (Li et al., 1999).

**Coagulación/Floculación:** En el proceso de coagulación, al lixiviado se agregan químicos conocidos como coagulantes, que afectan la estabilidad de las partículas coloidales en la muestra. Esto hace que las partículas coloidales floculen (se aglomeren) y formen flóculos más grandes que pueden eliminarse del lixiviado por sedimentación en un período de tiempo apropiado (Z. Wang et al., 2002). La coagulación implica la mezcla instantánea de coagulantes en el lixiviado seguido de un proceso de floculación, que es el proceso de agitación lenta, para lograr el tamaño de flóculos, adecuado para el asentamiento (Chen, 1996).

La coagulación y la floculación son aplicadas generalmente para la eliminación de partículas coloidales que se precipitan lentamente al fondo y también, se han utilizado para la eliminación de nutrientes. Para un tratamiento eficaz de los lixiviados por coagulación-floculación, son importantes factores como la selección de tipos y dosis de coagulantes, el efecto del pH, los parámetros del lixiviado y la producción de lodos, que han sido estudiados por varios investigadores (Amokrane et al., 1997).

**Extracción con aire (EA):** La extracción por aire es un proceso de llevar el aire al lixiviado o airear el lixiviado. La EA es usada comúnmente para la eliminación del sulfuro de hidrógeno (olor y sabor), la eliminación del dióxido de carbono (minimizar la utilización de cal) y eliminación de los COV. El proceso de EA depende de la eficacia en la mezcla entre las fases (aire y lixiviado) y en la maximización del área de contacto entre las dos (Ozturk et al., 2003). Varios tipos de operaciones que se pueden utilizar en el proceso son los depósitos de decapado (difuso y aireado mecánicamente) y las torres de decapado (torre de rociado, bandeja o empaquetada). Numerosos investigadores han informado de la aplicación de la separación por aire como un tratamiento alternativo de lixiviados para reducir el nitrógeno amoniacal. El proceso de EA también se ve afectado, por la temperatura circundante, ya que la temperatura fría reduce la eliminación de nitrógeno amoniacal (Cheung et al., 1997).

**2.4 Procesos Tecnológicos (a través de membranas):** *Microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa.*

**Microfiltración (MF):** La membrana MF, es una membrana porosa que tiene el tamaño de poro más grande entre todos los procesos de

membrana y se utiliza principalmente para separar micropartículas (clarificación) en el sistema de tratamiento (Tyre et al., 1991). Dado que el mecanismo de eliminación de las membranas de MF, se debe únicamente al filtrado de partículas, no puede tratar eficazmente las aguas residuales altamente contaminadas, como los lixiviados de vertederos. Los procesos de membrana MF son incapaces de eliminar bacterias y compuestos como el ácido húmico y los iones inorgánicos (Ahn et al., 2002).

**Ultrafiltración (UF):** UF pertenece al grupo de membranas porosas y es capaz de separar compuestos de partículas de menor tamaño en MF. El UF que puede producir agua de alta calidad con respecto a los sólidos en suspensión, se ha utilizado para la filtración directa o fluidos tratados biológicamente para reemplazar la sedimentación y mejorar la calidad (Pirbazari et al., 1996). Generalmente, un sistema de UF tubular convencional con velocidades de flujo de aproximadamente 4 m / s requiere un alto consumo de energía específica de aproximadamente 10 kWh / m<sup>3</sup> de permeado. Los procesos de UF se han investigado principalmente como un sistema de pretratamiento para ósmosis inversa y UF, ya que puede prevenir el ensuciamiento en el sistema de tratamiento adicional y también para su combinación con otros procesos de tratamiento (Syzdek & Ahlert, 1984).

**Nanofiltración (NF):** Durante los últimos años, los procesos de NF han ganado popularidad para reemplazar el proceso de Ósmosis inversa (OI) en el tratamiento de lixiviados. El proceso de NF también se denomina OI de baja presión debido a la selectividad del NF en la eliminación de iones dentro de las aguas residuales, debido a la diferencia de presiones osmóticas (Linde & Jönsson, 1995). El proceso NF puede eliminar los contaminantes mediante el tamizado y el transporte controlado por difusión (causado por la diferencia en la presión osmótica) para

las moléculas orgánicas y los iones inorgánicos, que es lo mismo que el OI (Morawe et al., 1995). En comparación con el OI, el NF tiene una estructura más suelta que puede eliminar los contaminantes dentro de tamaños de molécula que varían de 200 a 300 g/mol, lo que permite un flujo más alto y una presión de funcionamiento más baja que en la OI.

El NF también permite la eliminación de iones, debido a interacciones electrostáticas entre los iones y el NF. Membranas (Trebouet et al., 2001). Las interacciones electrostáticas ocurren porque la mayoría de las membranas NF son membranas compuestas de película delgada de polímeros hidrófobos con incorporación de un grupo cargado negativamente. Los procesos de NF se han enfocado para estudios de tratamiento de lixiviados por sus capacidades, que son casi similares a las de OI y se pueden aplicar a presiones operativas más bajas (Marttinen et al., 2002).

**Ósmosis inversa (OI):** La OI utiliza una membrana semipermeable como barrera entre dos soluciones con diferentes concentraciones. De aquí en adelante, se genera presión osmótica entre las dos soluciones y la separación se logra aplicando más presión que la presión osmótica en la que solo el solvente pasará a través de la membrana. Al tamizar el mecanismo, el proceso de OI también elimina casi todos los constituyentes con una masa molecular de aproximadamente 150 kg / kmol (Kattel et al., 2016). Para el tratamiento mediante proceso de OI, la alta conductividad del lixiviado es un parámetro importante para considerar, ya que funciona según el principio de diferencia en la presión osmótica. La conductividad (sólido disuelto) del lixiviado que está relacionada con la concentración de sales, es un parámetro importante debido a que su relación indetermina la presión osmótica (Rautenbach et al., 1997).

### 2.5 Dificultades para tratar el lixiviado de vertederos.

En la actualidad, las dificultades que más se suelen presentar durante el tratamiento de los lixiviados son las siguientes:

- El lixiviado tiene un alto contenido orgánico y una gran cantidad de moléculas orgánicas y tóxicas. Los estándares de descarga, no se pueden lograr utilizando un solo proceso bioquímico o fisicoquímico; Se requiere una combinación de procesamiento fisicoquímico y bioquímico. Elegir un proceso combinado razonable, económico y eficiente es el primer desafío (Martinez-Lopez et al., 2014).
- Los niveles de nitrógeno amoniacal, son altos y es difícil identificar un proceso de eliminación de nitrógeno efectivo y completo para los lixiviados. Los procesos de tratamiento biológico tradicionales pueden eliminar eficazmente el nitrógeno amoniacal, pero no es ideal para la eliminación del nitrógeno total. Mejorar la eficiencia de la eliminación del nitrógeno total mediante el proceso de tratamiento biológico es la segunda dificultad clave (Domènech et al., 2001).
- Los cambios significativos en la calidad y cantidad del agua aumentan la dificultad de identificar un método de descarga estándar estable. En diferentes temporadas, la calidad y cantidad del agua lixiviada puede ser muy diferente, lo que desafía tanto la selección como la operación de un proceso de tratamiento adecuado. Identificar una combinación adecuada de tecnologías disponibles y cómo usarlas para asegurar una operación estable, es el tercer desafío en el tratamiento de lixiviados (Pellón Arrechea et al., 2015).
- El proceso de tratamiento es complejo y los costos son muy altos. Para lograr los

estándares de descarga, las plantas de tratamiento de lixiviados a menudo utilizan nanofiltración y ósmosis inversa, lo que hace que los costos de tratamiento sean altos. La reducción de costes en el tratamiento de lixiviados es la cuarta dificultad principal (F. Wang et al., 2003).

### 3. CONCLUSIONES

Muchos desechos municipales e industriales todavía terminan en el vertedero y, en consecuencia, la cantidad de desechos depositados es significativa en todo el mundo. A pesar de que la separación de desechos está aumentando, los orgánicos todavía están en el relleno sanitario y proporcionan un buen ambiente para los procesos microbianos, lo que resulta en la producción de biogás y lixiviados. La composición y la cantidad de lixiviado varían con la edad y dependen de muchos factores. Los componentes importantes del lixiviado son compuestos orgánicos, que son degradables al comienzo de la operación del relleno sanitario y se vuelven cada vez más persistentes y potencialmente peligrosos durante los procesos bióticos y abióticos en el cuerpo del relleno sanitario. Estas sustancias tóxicas deben eliminarse adecuadamente para evitar la contaminación ambiental.

Es preciso identificar la adecuada combinación de tratamientos bioquímicos y fisicoquímicos para la eliminación de los lixiviados de los vertederos. Igualmente, mejorar la potencialidad del proceso de tratamiento bioquímico, la optimización de la tasa de eliminación de nitrógeno total y la reducción de los costos serían los desafíos principales que se asocian a los procesos de tratamiento de lixiviados.

Los procesos de lodos activados son la tecnología preferida para el tratamiento de lixiviados en los vertederos, una descarga que cumpla con los estándares requeridos sería fácil de realizar, si se pudieran resolver los problemas de materia orgánica y nitrógeno total.

Los tratamientos de lixiviados como la nitrificación / desnitrificación no es capaz de eliminar la amplia gama de contaminantes en el lixiviado de vertederos. El tratamiento no alcanza el nivel óptimo exigido por la ley en muchos países. Por lo tanto, para alcanzar estos estándares, se han aplicado muchos tratamientos que involucran procesos fisicoquímicos para el tratamiento de lixiviados.

Por lo general, las combinaciones de procesos para el tratamiento de lixiviados a fin de mejorar la eficiencia y obtener una concentración más baja en el nivel de descarga son demasiado costosas, lo que las hace inviables y solo deben considerarse para lixiviados de desechos extremadamente peligrosos.

El tratamiento biológico en forma de reciclaje y tratamiento combinado con aguas residuales domésticas, así como el tratamiento bacteriano con lodos activados en condiciones aeróbicas y anaeróbicas, han cobrado relevancia en la última década. Estos tratamientos parecen ser un método prometedor para la eliminación de materia orgánica biodegradable y refractaria del lixiviado del vertedero.

Antes de la aplicación a escala industrial (scale-up), generalmente se requiere una investigación a escala de laboratorio y planta piloto desde el punto de vista de la ingeniería. En donde las pruebas de laboratorio de

toxicidad y biodegradabilidad sean factibles para llevar a cabo el comienzo del proceso de tratamiento de lixiviados tanto para pequeña, mediana y gran escala.

Se ha trabajado mucho en el tratamiento biológico de los lixiviados de vertedero, pero aún existe una brecha en la modelización matemática de este proceso, que no ha ganado en importancia como en otros campos de la biotecnología. Por lo tanto, esta herramienta de ingeniería debe de ser considerada para investigarse y aplicarse más a fondo.

El proceso combinado de adsorción y precipitación química, es una opción eficaz de pretratamiento in situ para proteger una planta de tratamiento de aguas residuales contra cualquier posible carga de choque orgánico. La adsorción y la precipitación química tienen características distintivas de operación simple, flexible, estable y confiable contra la fluctuación de la calidad del lixiviado y el caudal, y podrían usarse como pre y postratamiento, o como opción de mejora.

El rendimiento y confiabilidad de la técnica, la flexibilidad de la planta y la rentabilidad son los factores clave que juegan un papel importante, en la selección del sistema de tratamiento más adecuado para los lixiviados. Todos los factores mencionados anteriormente, deben tenerse en cuenta a la hora de seleccionar el tratamiento más eficaz y económico para proteger el medio ambiente.

#### 4. BIBLIOGRAFÍA

- Ağdağ, O. N., & Sponza, D. T. (2005). Anaerobic/aerobic treatment of municipal landfill leachate in sequential two-stage up-flow anaerobic sludge blanket reactor (UASB)/completely stirred tank reactor (CSTR) systems. *Process Biochemistry*, 40(2), 895–902.

- <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.02.021>
- Ahn, W.-Y., Kang, M.-S., Yim, S.-K., & Choi, K.-H. (2002). Advanced landfill leachate treatment using an integrated membrane process. *Desalination*, *149*(1–3), 109–114. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00740-3](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00740-3)
- Amokrane, A., Comel, C., & Veron, J. (1997). Landfill leachates pretreatment by coagulation-flocculation. *Water Research*, *31*(11), 2775–2782. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00147-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00147-4)
- Baig, S., Coulomb, I., Courant, P., & Liechti, P. (1999). Treatment of Landfill Leachates: Lapeyrouse and Satrod Case Studies. *Ozone: Science & Engineering*, *21*(1), 1–22. <https://doi.org/10.1080/01919519908547255>
- Bekbölet, M., Lindner, M., Weichgrebe, D., & Bahnemann, D. W. (1996). Photocatalytic detoxification with the thin-film fixed-bed reactor (TFFBR): Clean-up of highly polluted landfill effluents using a novel TiO<sub>2</sub>-photocatalyst. *Solar Energy*, *56*(5), 455–469. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(96\)00020-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(96)00020-5)
- Bohdziewicz, J., Neczaj, E., & Kwarciak, A. (2008). Landfill leachate treatment by means of anaerobic membrane bioreactor. *Desalination*, *221*(1–3), 559–565. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.117>
- Chen, P. H. (1996). Assessment of leachates from sanitary landfills: Impact of age, rainfall, and treatment. *Environment International*, *22*(2), 225–237. [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(96\)00008-6](https://doi.org/10.1016/0160-4120(96)00008-6)
- Cheung, K. C., Chu, L. M., & Wong, M. H. (1997). Ammonia stripping as a pretreatment for landfill leachate. *Water, Air, and Soil Pollution*, *94*(1–2), 209–221. <https://doi.org/10.1007/BF02407103>
- Christensen, T. H., Kjeldsen, P., Bjerg, P. L., Jensen, D. L., Christensen, J. B., Baun, A., Albrechtsen, H.-J., & Heron, G. (2001). Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied Geochemistry*, *16*(7–8), 659–718. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(00\)00082-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(00)00082-2)
- Costa, A. M., Alfaia, R. G. de S. M., & Campos, J. C. (2019). Landfill leachate treatment in Brazil – An overview. *Journal of Environmental Management*, *232*, 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.006>
- Domènech, X., Jardim, W., & Litter, M. (2001). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. *Academia*, 3–26.
- Duggan, J. (2005). The potential for landfill leachate treatment using willows in the UK—A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, *45*(2), 97–113. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.02.004>
- Foul, A. A., Aziz, H. A., Isa, M. H., & Hung, Y. T. (2009). Primary treatment of anaerobic landfill leachate using activated carbon and limestone: batch and column studies. *International Journal of Environment and Waste Management*, *4*(3/4), 282. <https://doi.org/10.1504/IJEW.2009.027397>
- Gelvez, J. H. S., & Contreras, A. Á. (2006). Tratamiento biológico del lixiviado generado en el relleno sanitario “El Guayabal” de la ciudad San José de Cúcuta. *Ingeniería y Desarrollo*, *1*(20), 95–105.
- Giraldo, E. (2001). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes. *Revista de Ingeniería*, *14*, 44–55. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i14.538>
- Imai, A., Onuma, K., Inamori, Y., & Sudo, R. (1995). Biodegradation and adsorption in refractory leachate treatment by the biological activated carbon fluidized bed process. *Water Research*, *29*(2), 687–694. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00147-Y](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00147-Y)
- Kargi, F., & Yunus Pamukoglu, M. (2003). Simultaneous adsorption and biological treatment of pre-treated landfill leachate by

- fed-batch operation. *Process Biochemistry*, 38(10), 1413–1420. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00030-X)
- Kattel, E., Kivi, A., Klein, K., Tenno, T., Dulova, N., & Trapido, M. (2016). Hazardous waste landfill leachate treatment by combined chemical and biological techniques. *Desalination and Water Treatment*, 57(28), 13236–13245. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1057539>
- Klimiuk, E., & Kulikowska, D. (2006). Organics removal from landfill leachate and activated sludge production in SBR reactors. *Waste Management*, 26(10), 1140–1147. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.09.011>
- Li, X. Z., Zhao, Q. L., & Hao, X. D. (1999). Ammonium removal from landfill leachate by chemical precipitation. *Waste Management*, 19(6), 409–415. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(99\)00148-8](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(99)00148-8)
- Lim, P.-E., Lim, S.-P., Seng, C.-E., & Noor, A. M. (2010). Treatment of landfill leachate in sequencing batch reactor supplemented with activated rice husk as adsorbent. *Chemical Engineering Journal*, 159(1–3), 123–128. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.02.064>
- Lin, S. H., & Chang, C. C. (2000). Treatment of landfill leachate by combined electro-Fenton oxidation and sequencing batch reactor method. *Water Research*, 34(17), 4243–4249. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00185-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00185-8)
- Linde, K., & Jönsson, A.-S. (1995). Nanofiltration of salt solutions and landfill leachate. *Desalination*, 103(3), 223–232. [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(95\)00075-5](https://doi.org/10.1016/0011-9164(95)00075-5)
- Lindgaard-Jørgensen, P., & Nyholm, N. (1988). Characterization of the biodegradability of complex wastes. *Chemosphere*, 17(10), 2073–2082. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(88\)90018-5](https://doi.org/10.1016/0045-6535(88)90018-5)
- Liu, J., Luo, J., Zhou, J., Liu, Q., Qian, G., & Xu, Z. P. (2012). Inhibitory effect of high-strength ammonia nitrogen on bio-treatment of landfill leachate using EGSB reactor under mesophilic and atmospheric conditions. *Bioresource Technology*, 113, 239–243. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.114>
- Luo, L., Kaur, G., Zhao, J., Zhou, J., Xu, S., Varjani, S., & Wong, J. W. C. (2021). Optimization of water replacement during leachate recirculation for two-phase food waste anaerobic digestion system with off-gas diversion. *Bioresource Technology*, 335, 125234. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125234>
- Martinez-Lopez, A., Padrón-Hernández, W., Rodríguez-Bernal, O. F., Chiquito-Coyotl, O., Escarola-Rosas, M. A., Hernández-Lara, J., Elvira-Hernández, E. A., Méndez, G. A., Tinoco-Magaña, J., & Martínez-Castillo, J. (2014). Alternativas actuales del manejo de lixiviados. *Avances En Química*, 9(1), 37–47.
- Marttinen, S. ., Kettunen, R. ., Sormunen, K. ., Soimasuo, R. ., & Rintala, J. . (2002). Screening of physical–chemical methods for removal of organic material, nitrogen and toxicity from low strength landfill leachates. *Chemosphere*, 46(6), 851–858. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(01\)00150-3](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00150-3)
- Marulanda Cardona, V. F., Marulanda Buitrago, P. A., & Alvarado Acosta, D. H. (2017). Landfill leachate treatment by batch supercritical water oxidation. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 5–26. <https://doi.org/10.18359/rcin.2305>
- Masten, S. J., Galbraith, M. J., & Davies, S. H. R. (1996). Oxidation of 1,3,5-trichlorobenzene using advanced oxidation processes. *Ozone: Science & Engineering*, 18(6), 535–547. <https://doi.org/10.1080/01919512.1997.10382862>
- Meier, J., Melin, T., & Eilers, L. H. (2002). Nanofiltration and adsorption on powdered

- adsorbent as process combination for the treatment of severely contaminated waste water. *Desalination*, 146(1–3), 361–366. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00513-1](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00513-1)
- Méndez Novelo, R. I., Castillo Borges, E. R., Sauri Riancho, M. R., Quintal Franco, C. A., Giacomán Vallejos, G., & Jiménez Cisneros, B. (2009). Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(3), 133–145.
- Morawe, B., Ramteke, D. S., & Vogelpohl, A. (1995). Activated carbon column performance studies of biologically treated landfill leachate. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 34(3), 299–303. [https://doi.org/10.1016/0255-2701\(94\)04017-6](https://doi.org/10.1016/0255-2701(94)04017-6)
- Novelo, R. M., Borges, E. C., Riancho, M. R. S., Franco, C. Q., Vallejos, G. G., & Mejía, B. J. (2004). Tratamiento fisicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario. *Ingeniería*, 8(2), 155–163.
- Nyholm, N. (1991). The european system of standardized legal tests for assessing the biodegradability of chemicals. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 10(10), 1237–1246. <https://doi.org/10.1002/etc.5620101002>
- Nyholm, N. (1996). Biodegradability characterization of mixtures of chemical contaminants in wastewater — the utility of biotests. *Water Science and Technology*, 33(6), 195–206. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00326-5](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00326-5)
- Ozturk, I., Altinbas, M., Koyuncu, I., Arıkan, O., & Gomec-Yangin, C. (2003). Advanced physico-chemical treatment experiences on young municipal landfill leachates. *Waste Management*, 23(5), 441–446. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(03\)00061-8](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(03)00061-8)
- Pellón Arrechea, A., López Torres, M., Espinosa Lloréns, M. del C., & González Díaz, O. (2015). Propuesta para tratamiento de lixiviados en un vertedero de residuos sólidos urbanos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(2), 3–16.
- Pesci Pereira, C., da Conceição Pereira, T., Gomes, G., Quintaes, B. R., Bila, D. M., & Campos, J. C. (2018). Evaluation of reduction estrogenic activity in the combined treatment of landfill leachate and sanitary sewage. *Waste Management*, 80, 339–348. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.018>
- Pirbazari, M., Ravindran, V., Badriyha, B. N., & Kim, S.-H. (1996). Hybrid membrane filtration process for leachate treatment. *Water Research*, 30(11), 2691–2706. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00183-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00183-2)
- Ramírez Hernández, O. (2015). Identificación de problemáticas ambientales en Colombia a partir de la percepción social de estudiantes universitarios localizados en diferentes zonas del país. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 31(3), 293–310.
- Rautenbach, R., Vossenkaul, K., Linn, T., & Katz, T. (1997). Waste water treatment by membrane processes — New development in ultrafiltration, nanofiltration and reverse osmosis. *Desalination*, 108(1–3), 247–253. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(97\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(97)00032-5)
- Reinhart, D. R., & Basel Al-Yousfi, A. (1996). The Impact of Leachate Recirculation On Municipal Solid Waste Landfill Operating Characteristics. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 14(4), 337–346. <https://doi.org/10.1177/0734242X9601400402>
- Rondón Toro, E., Szantó Narea, M., Pacheco, J. F., Contreras, E., & Gálvez, A. (2016). *Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios* (Issue 2). Publicación de las Naciones Unidas.
- Sáez, A., & Urdaneta, J. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia Año*, 20(3), 1315–8856.

- Sanguanpak, S., Chiemchaisri, C., Chiemchaisri, W., & Yamamoto, K. (2015). Influence of operating pH on biodegradation performance and fouling propensity in membrane bioreactors for landfill leachate treatment. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 102, 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.03.024>
- Schulze-Rettmer, R. (1991). The Simultaneous Chemical Precipitation of Ammonium and Phosphate in the form of Magnesium-Ammonium-Phosphate. *Water Science and Technology*, 23(4–6), 659–667. <https://doi.org/10.2166/wst.1991.0516>
- Sohoo, I., Ritzkowski, M., & Kuchta, K. (2021). Influence of moisture content and leachate recirculation on oxygen consumption and waste stabilization in post aeration phase of landfill operation. *Science of The Total Environment*, 773, 145584. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145584>
- Syzdek, A. C., & Ahlert, R. C. (1984). Separation of landfill leachate with polymeric ultrafiltration membranes. *Journal of Hazardous Materials*, 9(2), 209–220. [https://doi.org/10.1016/0304-3894\(84\)80018-7](https://doi.org/10.1016/0304-3894(84)80018-7)
- Torres-Lozada, P., Barba-Ho, L. E., Ojeda, C., Martínez, J., & Castaño, Y. (2014). Influencia de la edad de lixiviados sobre su composición físico-química y su potencial de toxicidad. *U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17(1), 245–255.
- Trebouet, D., Schlumpf, J. ., Jaouen, P., & Quemeneur, F. (2001). Stabilized landfill leachate treatment by combined physicochemical–nanofiltration processes. *Water Research*, 35(12), 2935–2942. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00005-7)
- Tyre, B. W., Watts, R. J., & Miller, G. C. (1991). Treatment of Four Biorefractory Contaminants in Soils Using Catalyzed Hydrogen Peroxide. *Journal of Environmental Quality*, 20(4), 832–838. <https://doi.org/10.2134/jeq1991.00472425002000040021x>
- Wang, F., Smith, D. W., & El-Din, M. G. (2003). Application of advanced oxidation methods for landfill leachate treatment – A review. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2(6), 413–427. <https://doi.org/10.1139/s03-058>
- Wang, Z., Zhang, Z., Lin, Y., Deng, N., Tao, T., & Zhuo, K. (2002). Landfill leachate treatment by a coagulation–photooxidation process. *Journal of Hazardous Materials*, 95(1–2), 153–159. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00116-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00116-4)
- Wu, J. J., Wu, C.-C., Ma, H.-W., & Chang, C.-C. (2004). Treatment of landfill leachate by ozone-based advanced oxidation processes. *Chemosphere*, 54(7), 997–1003. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.10.006>
- Xing, T., Kong, X., Dong, P., Zhen, F., & Sun, Y. (2020). Leachate recirculation effects on solid-state anaerobic digestion of Pennisetum hybrid and microbial community analysis. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 95(4), jctb.6310. <https://doi.org/10.1002/jctb.6310>
- Žgajnar Gotvajn, A., & Pavko, A. (2015). Perspectives on Biological Treatment of Sanitary

## ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE DESECHOS DE CAFÉ VS DESECHOS PORCINOS EN LA FINCA "VILLA JULIANA" EN LA VEREDA EL MORAL DEL MUNICIPIO DE PÁRAMO, SANTANDER

Paula Daniela Chacón Ballesteros<sup>1</sup>

Alexis Rodríguez Cañón<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ingeniera Ambiental, <sup>2</sup>Administrador público,

ISSN: 2590-6704

### RESUMEN

Hoy en día el planeta sufre las graves consecuencias del cambio climático y el uso de energía de fuentes convencionales, provoca la emisión de gases contaminantes que aportan a el efecto invernadero, además de agotar los recursos no renovables; por lo tanto, la producción de biogás en biodigestores a partir de los desechos de las fincas, es una buena forma de lograr energía en el sector rural ayudando al planeta y a las personas.

El objetivo de este documento, es analizar de manera comparativa la producción de biogás a partir de dos clases de desechos, uno de origen vegetal y otro de origen animal, los cuales están disponibles en la Finca "Villa Juliana" en la Vereda El Moral del Municipio de Páramo, Santander, para lo cual se usarán los datos de cantidades de la finca y se calcula la producción de biogás de manera teórica, mediante un diseño a escala, con lo cual se pretende conocer la eficiencia del biodigestor a partir de los tipos de desechos utilizados como carga y algunas mezclas de ellos. Para el desarrollo de este proyecto, se tuvo en cuenta las falencias de las familias campesinas en cuanto a la debida disposición de los desechos del café, así como, los desechos de actividades porcícolas, las cuales se evidenciaron en la Provincia Guanentina, Santander

Así las cosas, dependiendo de la disponibilidad de la finca y sus condiciones de temperatura, se recomienda la implementación de biodigestores tubulares alimentados con desechos de origen animal, y en mezcla con desechos de origen vegetal, como los desechos del café y que se tenga en cuenta siempre la relación optima de diseño del biodigestor que recomiendan las guías citadas.

**Palabras Clave:** Biodigestor, Biogas, Tratamiento de residuos orgánicos.

### ABSTRACT

Today the planet suffers the serious consequences of climate change and the use of energy from conventional sources causes the emission of polluted gases with the greenhouse effect, contributing to said change, in addition to depleting non-renewable resources; The production of biogas in biodigesters from farm waste is a good way to achieve energy in the rural sector, helping the planet and people.

The objective of this document is to analyze in a comparative way the production of biogas from two kinds of waste, one of vegetable origin and the other of animal origin, which are available at the "Villa Juliana" Farm in the Vereda El Moral of the Municipality of Páramo, Santander, for which the farm quantity data will be used and biogas production is calculated theoretically, through a scale

design, with which it is intended to know the efficiency of the biodigester from the types of waste. used as cargo and some mixtures of them. For the development of this project, the shortcomings of peasant families were taken into account in terms of the proper disposal of coffee waste, as well as waste from pig activities, which were evidenced in the Guanentina Province, Santander.

Thus, depending on the availability of the farm and its temperature conditions, the implementation of tubular biodigesters fed with waste of animal origin, and mixed with waste of vegetable origin such as coffee waste, is recommended, always taking into account the optimal biodigester design ratio recommended by the cited guides.

**Keywords:** *Biodigester, Biogas, Treatment of organic waste.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, a nivel global se enfrentan las graves y perjudiciales consecuencias del cambio climático, debido a las afectaciones del ambiente por el consumo indiscriminado de los recursos naturales como de la generación de gases contaminantes dados por la combustión de derivados del petróleo.

Colombia, en cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible ha desarrollado normatividad que incentiva la generación y uso de fuentes no convencionales de energía renovable, para contrarrestar los efectos en el ambiente del uso de energías de fuentes convencionales.

El municipio de Páramo, Santander se caracteriza por sus actividades agrícolas y pecuarias, por tanto, pretendemos realizar un análisis comparativo de la generación de biogás, a partir de las alternativas presentes en la región, como son los subproductos del café y los desechos porcinos.

La importancia de abordar el análisis comparativo de la producción de biogás, a partir de biodigestores alimentados con desechos orgánicos como el estiércol porcino y desechos del café como la pulpa, radica en que estos sectores están presentes en la región y son efectivos para el aprovechamiento de los residuos y la generación del propio combustible, para el uso de los agricultores en sus viviendas, además de disminuir con esta tecnología, la inadecuada disposición de dichos residuos.

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1 Marco teórico

El análisis que se realiza en este trabajo está orientado con ciertos conceptos que se retoman para dar claridad y dirección al desarrollo del mismo, por lo tanto, a continuación, se definen de la siguiente manera:

Para el desarrollo del análisis, el biogás es un gas que resulta del trabajo de microorganismos vivos y el cual se puede usar entre otras como fuente de energía calórica, útil en la cocción de alimentos sin emisión de contaminantes al ambiente.

Ahora bien, para la producción de dicho gas natural nos encontramos con el concepto del biodigester el cual, según Herrero (2008) “es un sistema natural que aprovecha la digestión anaerobia (en ausencia de oxígeno) de las bacterias que ya habitan en el estiércol, para transformar éste en biogás y fertilizante” (p.15).

De acuerdo con Gobierno de la Provincia de Santa Fe, (S.f.) los componentes de un biodigester son:

**Reactor:** El reactor corresponde al dispositivo principal donde ocurre el proceso bioquímico de degradación de la materia orgánica. Los reactores de digestión pueden tener diferentes formas, como por ejemplo cilíndrica, cúbica,

ovoide o rectangular. Los digestores modernos tienen cubiertas, fijas o flotantes, cuya misión es conservar la temperatura, evitar la entrada de oxígeno y recoger el gas producido. Pueden estar contruidos de distintos materiales desde una piscina cubierta de polietileno de alta densidad, plástico, concreto hasta acero inoxidable. Dependiendo del diseño del reactor, éste podrá contar o no con un sistema de agitación.

**Cámara de entrada o de carga:** Es un dispositivo que facilita el proceso de alimentación o carga del biodigestor. Generalmente el afluente se coloca en el extremo superior del reactor; aunque también puede construirse una cámara pequeña donde se coloca lo que va a ingresar al biodigestor. También la carga puede almacenarse en tanques y luego bombearse o decantar hasta el reactor.

**Salida del efluente:** En un digestor de cubierta fija puede haber uno o varios tubos de salida colocados a distintos niveles, para la extracción del efluente. Por regla general, se elige aquel nivel que extraiga un efluente de mejor calidad (con la menor cantidad posible de sólidos). Adicionalmente, puede haber en la parte más baja del biodigestor una salida para lodos, pero no es muy utilizado, ya que se barre gran parte de la carga bacteriana del mismo.

**Salida y sistema de gas:** El sistema de gas lo traslada desde el biodigestor donde se produce hasta los quemadores o su uso final (Gobierno de la Provincia de Santa Fe, S.f, p.1).

Entonces tenemos el concepto de la digestión anaeróbica o biometanización, según Montalván Angélica (2015):

Es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla

de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno. Los estudios bioquímicos y microbiológicos, realizados hasta ahora dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas:

**1. Hidrolisis:** es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos. Por tanto, es el proceso de hidrolisis el que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica. La hidrolisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos.

**2. Etapa fermentativa o acidogénica:** Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metalogénicas (acético, fórmico, H<sub>2</sub>) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por las bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no solo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema.

**3. Etapa acetogénicas:** Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H<sub>2</sub> y acético) y otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato (CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>) e hidrogeno (H<sub>2</sub>), a través de las bacterias acetogénicas. Al contrario que las bacterias acetogénicas, estas no producen hidrogeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen

como sustrato. Según se ha estudiado, el resultado neto del metabolismo homoacetogénico, permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas. A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente.

**4. Etapa metanogénica:** Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización (Montalván Angélica (2015, pp. 19-20).

Otro concepto relevante del análisis es el de temperatura y tiempo de retención que según Jaime Martí Herrero (2008):

En el proceso de digestión anaerobia son las bacterias metanogénicas las que producen, en la parte final del proceso, metano. Existen diferentes poblaciones de bacterias metanogénicas y cada una de ellas requiere una temperatura para trabajar de forma óptima. Existen poblaciones metanogénicas que tienen su mayor rendimiento a 70°C de temperatura, pero para ello habría que calentar el lodo interior del biodigestor. Hay otras poblaciones que tienen su rango óptimo de trabajo de 30 a 35 °C. Estas temperaturas se pueden alcanzar en zonas tropicales de manera natural. La actividad de las bacterias desciende si estamos por encima o por debajo, del rango de temperaturas óptimas de trabajo.

En biodigestores sin sistema de calefacción, se depende de la temperatura ambiente que, en muchas regiones, es inferior al rango de temperaturas óptimas. A menores temperaturas, se sigue produciendo biogás, pero de manera más lenta. A temperaturas inferiores a 5°C, se puede decir que las bacterias quedan 'dormidas' y ya no producen biogás.

El tiempo de retención es la duración del proceso de digestión anaerobia, es el tiempo que requieren las bacterias para digerir el lodo y producir biogás. Este tiempo, por tanto, dependerá de la temperatura de la región donde se vaya a instalar el biodigestor. Así, a menores temperaturas, se requiere un mayor tiempo de retención que será necesario para que las bacterias que tendrán menor actividad, tengan tiempo de digerir el lodo y de producir biogás (Herrero, 2008, p.27).

*Tabla 6. Tiempo de retención según temperatura*

Región característica	Temperatura (°C)	Tiempo de retención (días)
Trópico	30	20
Valle	20	30
Altiplano	10	60

**Nota.** Tomado de Biodigestores Familiares, Guía de diseño y manual de instalación (p. 27), por Jaime Martí Herrero, 2008, GTZ-Energía, Bolivia.

Otro concepto relevante es el del biogás, que según la FAO (2019):

Es un gas compuesto principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), en proporciones variables dependiendo de la composición de la materia orgánica a partir de la cual se ha generado. Las principales fuentes de biogás son los residuos ganaderos y agroindustriales, los lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas y la fracción orgánica de los residuos domésticos.

La composición química del biogás depende del sustrato que se utilice para alimentar el biodigestor, de la tecnología utilizada y de la temperatura de procesos. Los componentes principales son:

**Metano (CH<sub>4</sub>):** es un gas combustible que se encuentra con una concentración de entre 45% (a partir de la cual se considera que el biogás es inflamable) y 70% molar.

**Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>):** es el segundo gas más importante por su proporción. Su concentración varía en un rango de 25% a 45% molar.

**Sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S):** es generado por microorganismos anaeróbicos reductores de sulfato ante la presencia de este, en cantidades que varían en función de la composición del sustrato utilizado para alimentar el biodigestor. Aún en muy bajas concentraciones, el H<sub>2</sub>S es tóxico para humanos y animales, y altamente corrosivo: si no es eliminado del biogás, provoca una drástica disminución de la vida útil de los equipos donde se emplea. En una muestra cruda de biogás, el valor de H<sub>2</sub>S puede variar en un rango entre 5000 y 50000 partes por millón (ppm).

**Hidrógeno (H<sub>2</sub>):** normalmente, la concentración de este componente es inferior a las 5000 ppm.

**Nitrógeno gaseoso (N<sub>2</sub>):** su presencia puede llegar a un máximo de 25% molar en biogases obtenidos de rellenos sanitarios; en sistemas con biodigestores, normalmente la concentración no supera el 5% molar.

**Oxígeno (O<sub>2</sub>):** el máximo valor que puede alcanzar en el biogás es de 5% molar.

**Agua (H<sub>2</sub>O):** es normal encontrar vapores de agua, especialmente cuando se trabaja con procesos termofílicos.

La composición del biogás, es la que determinará su poder calorífico, es decir, la cantidad de energía por unidad de masa o unidad de volumen de materia que puede desprenderse al producirse una reacción química de oxidación (FAO, 2019, pp. 23-24).

Por otro lado, al respecto de los desechos de origen vegetal, la definición que tomaremos de la pulpa de café es la expresada por la Federación de Cafeteros, en la revista CENICAFE por Rodríguez Nelson & Zambrano Diego (2010):

La pulpa de café es el primer producto que se obtiene en el procesamiento del fruto de café y representa en base húmeda alrededor del 43,58% del peso del fruto seco.

El promedio de la producción de pulpa es de 2.25 t/ha-año. Por cada millón de sacos de 60 Kg de café almendra que Colombia exporta, se generan 162.900 t de pulpa fresca, que si no se utilizan adecuadamente producirían una contaminación equivalente a la generada durante un año, con excretas y orina por una población de 868.736 habitantes (Rodríguez Nelson & Zambrano Diego, 2010, p. 2).

Es importante mencionar que, en el proceso de beneficio e industrialización del café, se genera un 92.4 % de pérdidas en desechos, según lo descrito por Rodríguez Nelson & Zambrano Diego (2010) adaptado de Calle Vélez H (1977), en la siguiente tabla:

**Tabla 2.** Residuos obtenidos en el proceso de beneficio e industrialización de 1 Kg de café cereza.

Proceso	Residuo obtenido	Pérdida (en gramos)
Despulpado	Pulpa fresca	436
Desmucilaginado	Mucilago	149
Secado	Agua	171
Trilla	Pergamino	42
	Película plateada	
Torrefacción	Volátiles	22
Preparación bebida	Borra	104
Pérdida acumulada	924	

**Nota:** Tomado de Los Subproductos del café: Fuente de energía renovable (p. 2), por Nelson Rodríguez & Diego Zambrano, 2010, CENICAFE, Chinchiná, Caldas, Colombia.

## 2.2 Marco Legal

La Constitución Política de Colombia, establece que es deber del Estado proteger la diversidad en integración del ambiente, planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales a fin de garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución y prevenir los factores de deterioro ambiental en cumplimiento de los artículos 79 y 80 de la Constitución Política, garantizando así el derecho a gozar de un ambiente sano.

La Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos, establecida en el CONPES 3874 de 2016, la cual está enfocada en la gestión de los residuos sólidos no peligrosos y “busca aportar al desarrollo sostenible y a la adaptación y mitigación del cambio climático, y plantea la base inicial para avanzar hacia la economía circular desde la gestión integral de residuos sólidos. A partir de esta, se quiere lograr que el valor de los productos y materiales se mantengan durante el mayor tiempo posible en el ciclo productivo, que los residuos y el uso de recursos se reduzcan al mínimo, y que los recursos se conserven dentro de la economía cuando un producto ha llegado al final de su vida útil, con el fin de

volverlos a utilizar repetidamente y seguir creando valor” (Consejo Nacional De Política Económica Y Social, 2016, p.11).

En Colombia la Ley 1715 de 2014 promueve con incentivos tributarios, la generación y uso de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable FNCE y lo contempla en su artículo séptimo así: “El Gobierno Nacional promoverá la generación con FNCE y la gestión eficiente de la energía mediante la expedición de los lineamientos de política energética, regulación técnica y económica, beneficios fiscales, campañas publicitarias y demás actividades necesarias, conforme a las competencias y principios establecidos en esta ley y las Leyes 142 y 143 de 1994”.

Igualmente, el Estatuto tributario en su artículo 256 modificado por el artículo 171 de la Ley 1955 de 2019 contempla el “descuento para inversiones realizadas en investigación, desarrollo tecnológico o innovación y ofrece a los inversionistas que tendrán derecho a descontar de su impuesto sobre la renta a cargo el 25% del valor invertido en dichos proyectos en el período gravable en que se realizó la inversión”.

Por último, con relación a la regulación del combustible con biogás, Colombia a través de la Comisión de Regulación de Energía y Gas, expidió la Resolución 135 del 16 de noviembre de 2012, por la cual se adoptan normas aplicables al servicio público domiciliario de gas combustible con biogás, donde se encuentra el régimen de las actividades relacionadas con el biogás.

### 3. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto, se tuvo en cuenta las falencias de las familias campesinas en cuanto a la debida disposición de los desechos del café, así como, los desechos de actividades porcícolas, las cuales se evidenciaron en la Provincia Guanentina, Santander.

Para lograr el análisis comparativo de la producción de biogás, a partir de la descomposición de sustancias de origen animal y vegetal, como lo son el estiércol porcino y la pulpa de café, se realizó una búsqueda de la información documentada que contribuyera al análisis, encontrando y seleccionando veinte documentos tanto de las bases de datos de la biblioteca de la Universidad Libre de Colombia, seccional Socorro, como de otros orígenes en la Web.

Después de analizar la información documentada, se determinaron las variables a usar en el análisis, para medir la eficiencia, las ventajas y desventajas de los procesos propuestos y estas variables son las siguientes:

**Tabla 3.** Variables del análisis comparativo.

Variable	Tipo de producto para Carga (animal - vegetal)	Temperatura	Tiempo de Retención	Biogás producido	Carga Diaria
Rango	1-100	10-30	20-60	100-300	1-6
Unidades	%	° C	días	litros	Kg

**Fuente:** Elaboración propia

Se toma la conversión de 1 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> (Metano) que equivale a 3.8 kW/h de energía calórica (Castro Molano, Parrales Ramírez, & Escalante Hernández, 2019).

Igualmente, se realizaron consultas en la Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral del Municipio de Páramo, Santander (ver Figura 1). Para establecer las cantidades del cultivo de café existente y con ellos proyectar el sistema de indigestión a partir de los desechos del café, los cuales se calculan de acuerdo a los datos obtenidos en el proceso e industrialización de 1 kg de café cereza según lo descrito por Rodríguez Nelson & Zambrano Diego (2010) adaptado de Calle Vélez H (1977) ver Tabla 2.

**Figura 1.** Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral del Municipio de Páramo, Santander.



**Nota:** Tomado de Google Earth Pro, 2021.

Los datos consultados de la Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral del Municipio de Páramo, Santander, se observan en la Tabla

**Tabla 7.** Datos iniciales del cultivo de café de la Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral del Municipio de Páramo, Santander.

Área de Cultivo (Ha)	Cantidad de Plantas (Und)	Cosecha de Café Fruta (Kg)	Cosecha de Café Pergamino (Kg)
1.25	7000	8750	1875

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 2.** Cultivo de Café Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral, del Municipio de Páramo, Santander Cultivo de Café Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral, del Municipio de Páramo, Santander.



**Fuente:** Autores

Una vez calculados las cantidades disponibles de pulpa y mucilago de café, en la finca mencionada, se procede a formular y calcular teóricamente la construcción de los biodigestores tubulares de bajo costo, uno, alimentado con cargas de mezcla de productos de origen vegetal y el otro con productos de origen animal, de acuerdo a la guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares propuesto por Jaime Martí Herrero (2008), teniendo en cuenta las especificaciones particulares del lugar como temperatura, altura sobre el nivel del mar y otras.

Para los datos del biodigestor alimentado con productos en descomposición de origen animal usaremos la metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de la guía de diseño y manual de

instalación de biodigestores familiares propuesto por Jaime Martí Herrero (2008).

**Figura 3.** Actividad Porcícolas.



**Fuente:** Autores

Los datos de línea base los tomaremos de acuerdo a la producción de estiércol diaria según, el peso del cerdo calculada igualmente por Jaime Martí Herrero (2008), la cual corresponde a “4 kg de estiércol fresco diario producido por cada 100kg de peso del animal” (Herrero, 2008, p. 8).

Finalmente, se analizan los resultados teóricos, en cuanto a los costos necesarios para la construcción y operación de los biodigestores y el posible nivel de eficiencia, bajo condiciones deseables y las ventajas y desventajas de las dos opciones.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Cálculo de desechos del cultivo de café

Se calculan los datos de cantidad de subproductos del café, como la pulpa y el mucilago, resultante del cultivo de la finca “Villa Juliana” que tiene un área cultivada de 1.25 hectáreas con 7000 plantas de café, que producen 8750 Kg de café cereza en los meses de cosecha principal que se presenta en los meses de octubre, noviembre y diciembre, de los cuales quedarían 3813,25 kg de pulpa de café que corresponde al 43.58% del total del café cereza recogido en la cosecha, porcentaje descrito por el programa de investigación científica del Fondo Nacional de Cafeteros por Rodríguez Valencia & Zambrano Franco (2010)(p.2).

La disposición de dichos residuos debe ser objeto de tratamiento y buenas prácticas, ya sea en compostaje u otras formas de disposición final responsable, algunos productores consultados expresaron que realizan el tratamiento a la pulpa aplicándole cal o ceniza y disponiéndola en lugares para compostaje y otros la enterraban directamente en la tierra.

Por tanto, se obtuvo una disponibilidad mensual de pulpa de café de 1.271 kg, lo equivalente a una disponibilidad diaria de 42.37 kg, en época de cosecha.

Por otro lado, la disponibilidad mensual de mucilago de café es de 433.13 kg, equivalente a una disponibilidad diaria de 14.44 kg en época de cosecha.

**Tabla 8.** Disponibilidad diaria de residuos de café en la finca “Villa Juliana”

Producto	Kg/mes	Kg/día
Pulpa de café	1.271	42.37
Mucilago de café	433.13	14.44

**Fuente:** Elaboración propia

### 4.2 Calculo y Formulación del Biodigestor Cargado con Mezclas de Origen Vegetal

#### 4.2.1 Biodigestor Alimentado con Subproductos del Café

Aplicando la guía de diseño y manual de instalación de Biodigestores familiares propuesto por Jaime Martí Herrero (2008) se calcula el volumen total del Biodigestor: “El volumen total del biodigestor ha de albergar una parte líquida y otra gaseosa. Normalmente se da un espacio del 75% del volumen total a la fase líquida, y del 25% restante a la fase gaseosa. El volumen total es la suma del volumen gaseoso y el volumen líquido” (Herrero, 2008, p. 29), así:

$$VT = VG + VL$$

Y por tanto el volumen líquido es tres cuartas partes del total:

$$VL = VT \times 0.75$$

El volumen gaseoso es una cuarta parte del total:

$$VG = VT \times 0.25$$

Y el volumen gaseoso será igual a una tercera parte del volumen líquido:

$$VG = VL \div 3 \text{ (Herrero, 2008, p.29)}$$

Para el análisis teórico a escala, tomaremos una carga diaria igual al 10% de la cantidad disponible diaria de residuos de café de la finca “Villa Juliana”, es decir 4.23 kg de pulpa de café y 1.44 kg de mucilago, para una mezcla total de 5.67 kg de residuos de café y utilizando la concentración 4:1, le adicionamos 4 partes de agua que serían 22.68 litros, para una carga diaria de 28.35 litros.

La aplicación está dirigida a la Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral del municipio

de Páramo, Santander, donde se cuenta con una temperatura promedio de 20°C, su altura sobre el nivel del mar es de 1539.18 msnm y cuenta con una zona de vida de Bosque Húmedo Pre-Montano, según el Sistema de Información Geográfica de la CAS, por lo tanto se toma el tiempo de retención igual a 37 días, aplicando la guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares de Jaime Martí Herrero (2008)(p. 32).

Ya “que el biodigestor tubular es de flujo continuo, el volumen liquido V L será el resultado de multiplicar el tiempo de retención por la carga diaria” (Herrero, 2008, p. 29):

$$V L = 37 \times 28.35$$

$$V L = 1048.45 \text{ litros}$$

Ahora, para determinar el volumen gaseoso V G se divide el volumen liquido V L en 3:

$$V G = V L / 3$$

$$V G = 1048.45 / 3$$

$$V G = 349.48 \text{ litros}$$

Entonces el volumen total V T será igual a la sumatoria del volumen líquido y el volumen gaseoso:

$$V T = V L + V G$$

$$V T = 1048.45 + 349.48$$

$$V T = 1397.93 \text{ litros}$$

Ahora con la selección de esta medida de ancho del polietileno la relación optima entre el diámetro y la longitud sería igual a  $L/d = 4.38 / 0.64 = 6.84$ , cumpliendo con los parámetros de diseño óptimo.

Las investigaciones realizadas se han obtenido resultados de rendimiento de 25 litros de biogás por 1 kg de mezcla pulpa fresca alimentada en los biodigestores (Arcila O, 1979), entonces podría decirse en teoría que la producción del modelo de biodigestor a base de pulpa sería de  $5.67 \times 25 = 141.75$  litros de biogás diario.

Se recomienda para iniciar la fase de fermentación adicionar estiércol (bovino o porcino) para que las bacterias presentes en este, aceleren el proceso, esta recomendación se toma de (Calle Velez H. ,1974).

### 4.3 Cálculo y Formulación del Biodigestor Cargado con desechos de Origen Animal

#### 4.3.1 Biodigestor Alimentado con Estiércol Porcino

Según la Guía de diseño y manual de instalación de Biodigestores familiares propuesto por Jaime Martí Herrero (2008), el “estiércol que mayor cantidad de biogás produce es el del chanco y el humano” (Herrero, 2008, p.27).

Tomaremos como valor base de producción de estiércol porcino diario, el calculado por Jaime Martí Herrero, 2008, según el peso del animal (ver Tabla 8).

**Tabla 8.** Producción de estiércol fresco diario.  
Producción de estiércol fresco diario.

Ganado	Kg de estiércol fresco producido por cada 100 kg de peso del animal
Cerdo	4
Bovino	8
Caprino	4
Conejos	3
Equino	7
Humano adulto	0,4 kg por adulto
Humano niño	0,2 kg por niño

**Fuente:** Tomado de Biodigestores Familiares, Guía de diseño y manual de instalación (p. 28), por Jaime Martí Herrero, 2008, GTZ-Energía, Bolivia.

Por tanto, en nuestro caso para desarrollar el análisis comparativo tomaremos una cantidad de carga diaria igual a la carga diaria planteada para la mezcla de desechos de origen vegetal, es decir, de 5.67 kg, lo cual correspondería al

estiércol producido por dos cerdos de 70 kg aprox. lo cual se calculó de la siguiente manera:

$$4 \times 100$$

$$5.67 \times$$

$$X = 5.67 \times 100 / 4 = 141.75$$

Entonces, para este diseño se necesitan dos cerdos de 70 kg de peso.

Aplicando la guía de diseño y manual de instalación de Biodigestores familiares propuesto por Jaime Martí Herrero (2008) se calcula el volumen tal del Biodigestor: "El volumen total del biodigestor ha de albergar una parte líquida y otra gaseosa. Normalmente se da un espacio del 75% del volumen total a la fase líquida, y del 25% restante a la fase gaseosa. El volumen total es la suma del volumen gaseoso y el volumen líquido" (Herrero, 2008, p. 29), así:

$$VT = VG + VL$$

Y por tanto el volumen líquido es tres cuartas partes del total:

$$VL = VT \times 0.75$$

El volumen gaseoso es una cuarta parte del total:

$$VG = VT \times 0.25$$

Y el volumen gaseoso será igual a una tercera parte del volumen líquido:

$$VG = VL \div 3 \text{ (Herrero, 2008, p. 29).}$$

Para el análisis teórico presente, tomaremos una carga diaria igual a la producción de estiércol fresco diario de dos cerdos con un peso de 70 kg c/u y que producirían según la guía, unos 5.67 kg de estiércol diario y utilizando la concentración 4:1, le adicionamos 4 partes de agua que serían 22.68 litros, para una carga diaria de 28.35 litros.

La aplicación está dirigida a la Finca "Villa Juliana" en la Vereda El Moral del Municipio de

Páramo, Santander, donde se cuenta con una temperatura promedio de 20°C, su altura sobre el nivel del mar es de 1438 msnm y cuenta con una cobertura vegetal de bosque subandino, según el Sistema de Información Geográfica de la CAS, por lo tanto se toma el tiempo de retención igual a 37 días, aplicando la guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares de Jaime Martí Herrero (2008)(p. 32).

Calculamos el volumen líquido V L del biodigestor tubular de flujo continuo, el cual "será el resultado de multiplicar el tiempo de retención por la carga diaria" (Herrero, 2008, p. 29):

$$V L = 37 \times 28.35$$

$$V L = 1048.45 \text{ litros}$$

Ahora, para determinar el volumen gaseoso V G se divide el volumen líquido V L en 3:

$$V G = V L / 3$$

$$V G = 1048.45 / 3$$

$$V G = 349.48 \text{ litros}$$

Entonces el volumen total V T será igual a la sumatoria del volumen líquido y el volumen gaseoso:

$$V T = V L + V G$$

$$V T = 1048.45 + 349.48$$

$$V T = 1397.93 \text{ litros}$$

En este momento, ya conocido el volumen total necesario, se procede a determinar las dimensiones del biodigestor tubular, comenzando por la longitud y el radio del mismo.

El volumen total V L requerido en M3 sería igual a 1.4 M3, en la ciudad de Bogotá se encuentra el polietileno tubular de un ancho de rollo de 1 metros, con un calibre de 8 mm con las siguientes especificaciones:

**Tabla 9.** Especificaciones del Rollo de Polietileno tubular con relación óptima para uso con desechos de origen animal.

Ancho de Rollo (m)	Perímetro de la circunferencia (m)	Radio (m)	Diámetro (m)
1	2	0.32	0.64

**Fuente:** Elaboración propia

En este punto, evaluaremos la relación optima entre longitud y diámetro del biodigestor para lograr el volumen total requerido pues como lo dice (Herrero, 2008) “no conviene biodigestores demasiado cortos ni largos y para ello existe una relación optima entre el diámetro y la longitud que es 7 (..) Esta relación es flexible en un rango de 5 - 10, siendo la mejor 7” (Herrero, 2008, p.36).

Y tendríamos que:

$$\text{Sección eficaz} = \pi \times r^2$$

$$\text{Sección eficaz} = 3.1416 \times 0.32^2$$

$$\text{Sección eficaz} = 0.32 \text{ m}^2$$

Ahora despejamos L de la formula  $VT = \pi \times r^2 \times L$  teniendo que  $L = VT / (\pi \times r^2)$  y tendríamos:

$$L = VT / (\pi \times r^2)$$

$$L = 1.4 \text{ M}^3 / 0.32 \text{ m}^2$$

$$L = 4.38 \text{ m}$$

Ahora con la selección de esta medida de ancho del polietileno la relación optima entre el diámetro y la longitud sería igual a  $L/d = 4.38 / 0.64 = 6.84$ , cumpliendo con los parámetros de **diseño óptimo**.

Las investigaciones realizadas se han obtenido resultados de producción de biogás de las cuales hemos considerado la estimación realizada por (Herrero, 2008) quien dijo en su momento que:

Existen diferentes métodos para estimar la producción de biogás de un biodigestor según su carga diaria de estiércol, pero aquí se presenta lo que se denomina un “**número mágico**” para realizar este cálculo de forma sencilla.

La estimación de este “**número mágico**” se realiza a través de los conceptos de “**sólidos totales**” y “**sólidos volátiles**”. En la estimación se han considerado valores medios y por tanto el empleo de este “**número mágico**” sirve para tener una idea aproximada del volumen de biogás, generado por día siempre que se cumplan los tiempos de retención adecuados a cada temperatura de trabajo (Herrero, 2008, p. 30).

**Tabla 10.** Producción de biogás

Ganado	Número mágico (litros de biogás producidos por día por kilo de estiércol fresco cargado diariamente)
Cerdo	51
Bovino	35.3

**Fuente:** Tomado de Biodigestores Familiares, Guía de diseño y manual de instalación (p.30), por Jaime Martí Herrero, 2008, GTZ-Energía, Bolivia.

Entonces tendríamos que el resultado de la producción de biogás diario a base de estiércol de cerdo sería igual a multiplicar la carga de estiércol diaria por el número mágico correspondiente al cerdo:

$$5.67 \times 51 = \mathbf{289.17} \text{ litros diario de biogás.}$$

La alimentación del cerdo es clave para la eficiencia en la producción del biogás, ya que la experiencia ha demostrado que la alimentación a base de purinas produce menor cantidad de bacterias generadoras de biogás. Es factible que la alimentación de los cerdos, sea con productos propios de la finca que favorecen el proceso de generación de mayor cantidad de bacterias.

Tendríamos que la mayor producción de biogás sería el resultado de cargar el biodigestor con estiércol porcino así:

$$\text{Desechos de café} = \mathbf{141.75} \text{ litros de biogás diario}$$

Estiércol porcino = **289.17** litros diario de biogás.

Ahora, si se hiciera una mezcla de carga al 50 % combinando desechos de origen animal (estiércol porcino) con desechos de origen vegetal (desechos del café) se obtendría:

$$5.67 / 2 = 2.84$$

$$5.67 / 2 = 2.84$$

$$(2.84 * 51) + (25 * 2.84) = 144.84 + 71 = \mathbf{215.84}$$

litros diario de biogás.

Este resultado con una carga diaria mezclada al 50% animal y 50% vegetal, requeriría un solo cerdo de 70 kg de peso aproximadamente.

Mezcla para carga diaria de 70% de origen animal y 30 % de origen vegetal:

$$5.67 * 70\% = 3.97 \text{ estiércol} * 51 = 202.47$$

$$5.67 * 30\% = 1.70 \text{ desecho café} * 25 = 42.5$$

$$\text{Mezcla } 70 : 30 = \mathbf{244.97}$$

litros diarios de biogás.

Mezcla para carga diaria de 70% de origen vegetal y 30 % de origen animal:

$$5.67 * 70\% = 3.97 \text{ desechos de café} * 25 = 99.25$$

$$5.67 * 30\% = 1.70 \text{ estiércol porcino} * 51 = 86.7$$

$$\text{Mezcla } 30 : 70 = \mathbf{185.95}$$

litros de biogás diario

A continuación, se muestran los resultados del análisis teórico aplicado en la Finca "Villa Juliana" en la Vereda El Moral del Municipio de Páramo, Santander:

**Tabla 11.** Variables del análisis comparativo.

Tipo de producto para Carga	Temperatura (° C)	Tiempo de Retención (días)	Carga Diaria (Kg)	Biogás producido (litros)
Desechos de Café (vegetal)	20	37	5.67	141.75

Tipo de producto para Carga	Temperatura (° C)	Tiempo de Retención (días)	Carga Diaria (Kg)	Biogás producido (litros)
Estiércol Porcino (animal)	20	37	5.67	289.17

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo anterior, obtenemos que para el caso del desarrollo de un biodigestor alimentado con una carga diaria de 5.67 kg de desechos de café, a una temperatura ambiente promedio de 20 °C correspondiente al municipio de Páramo, Santander con un tiempo de retención de 37 días, se obtendría en teoría **141.75** litros de biogás diario. Por otro lado, para una carga diaria de 5.67 kg de desechos porcinos, con la misma condición de temperatura, tiempo de retención y en el mismo tamaño del biodigestor, se obtendría en teoría **289.17** litros de biogás, lo cual representa un aumento de **104 %** con relación al de desechos de café.

Ahora, para el caso del biodigestor alimentado con una mezcla de 50% de desechos de café y 50% de desechos porcinos, bajo las mismas condiciones de temperatura y retención se obtendría teóricamente **215.84** litros de biogás diario, lo cual representa un aumento con relación al biodigestor de desechos de café en **52.27%** y una disminución del **25.36%** con relación al biodigestor a base de desechos porcinos.

Para el caso de la mezcla a base de un **70%** de desechos de porcinos y un **30%** de desechos de café, bajo iguales condiciones de temperatura y retención, se obtendría **244.97** litros de biogás diario, lo cual representa un aumento con relación al biodigestor de desechos de café en **72.82%** y una disminución del **15.30%** con relación al biodigestor a base de desechos porcinos.

Finalmente, para el caso de la utilización de una carga mezclada con un 70% de desechos de café con un 30% de desechos porcinos, se obtendría teóricamente **185.95** litros de

biogás diario, lo cual representa un aumento con relación al biodigestor de desechos de café en **31.18%** y una disminución del **35.70%** con relación al biodigestor a base de desechos porcinos.

Según los resultados obtenidos, el bienestar más eficiente según el tipo de carga diaria es a base de desecho animal para este caso estiércol porcino, el cual se obtendría de 2 cerdos de aproximadamente **70 kg** de peso.

Para el caso de contar con un solo cerdo de 70 kg de peso, sería viable el biodigestor a base de mezcla de 50 % de desechos porcino y 50 % de desecho de café, la cual disminuiría solo un 25.36 % la cantidad de biogás producido respecto al más eficiente.

#### 4.4 Análisis Comparativo de los Costos de Construcción del Biodigestor Tubular Alimentado a Base de Desechos de Café y de Estiércol Porcino

De acuerdo a los cálculos resultantes de la estimación del volumen total requerido  $V_T = 1397.93$  litros, el biodigestor con una relación optima entre diámetro y longitud nos arrojó un diseño a escala con las siguientes dimensiones:

**Tabla 12.** Dimensiones del Biodigestor propuesto

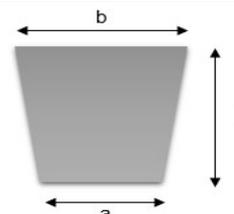
Ancho de Rollo (m)	Longitud (m)	Perímetro de la circunferencia (m)	Radio (m)	Diámetro (m)
1	4.38	2	0.32	0.64

**Fuente:** Elaboración propia.

Igualmente, basado en Herrero (2008) la dimensión de la “zanja según el ancho del Rollo” (Herrero, 2008, p.37) pueden ser las siguientes:

**Tabla 12.** Dimensiones de la zanja según el Ancho de Rollo (AR)

AR (m)	2	1.75	1.5	1.25	1
a (m)	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
b (m)	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
p (m)	1	0.9	0.8	0.7	0.5



**Fuente:** Tomado de Biodigestores Familiares, Guía de diseño y manual de instalación (p.37), por Jaime Martí Herrero, 2008, GTZ-Energía, Bolivia.

Como podemos ver en el caso nuestro, la zanja quedaría de 60 cm de profundidad (p), 30 cm de ancho en el fondo de la zanja (a) y 50 cm de ancho en la boca de la zanja(b), todas las medidas por la longitud calculada que es de 4.38 metros.

Así las cosas y estimando una distancia de 15 metros de la cochera al biodigestor y 10 metros de éste a la cocina del hogar, los materiales necesarios y sus costos serían los siguientes:

**Tabla 14.** Presupuesto para construcción de Biodigestor Tubular de Polietileno a precios de 2021.

Material	Cantidad	Precio Unitario (Pesos)	Precio Total (Pesos)
Tubería de 4" PVC	15 m	20.000	300.000
Codos de 4" PVC	2	9.800	19.600
Tubería de 1/2" PVC	12m	3.700	44.400
Adaptador hembra de 1/2 " PVC	1	500	500
Adaptador macho de 1/2 "PVC	1	500	500
Registro de paso de 1/2"	5	4500	22.500
Tee PVC 1/2"	4	750	3.000
Codo PVC 1/2"	4	600	2.400
Teflón	2	800	1.600
Soldadura PVC x 118 ml	1	28.900	28.900
Miple galvanizado 1/2" de 15 cm	4	3.500	14.000
Tubo galvanizado de 1/2", 10 cm	5	1.500	7.500
Codo galvanizado 1/2"	4	2.300	9.200
Liga de Neumático	40 m	500	20.000
Polietileno tubular (8mm, AR 1.00m)	8.76m	16.800	147.200
Polisombra	5m	4.000	20.000
<b>TOTAL</b>			<b>639.700</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2.** Modelo de biodigestor tubular en polietileno.

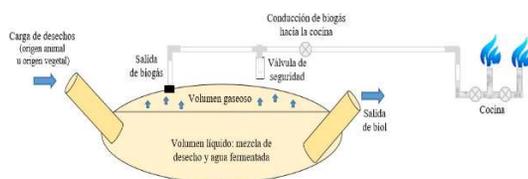


**Fuente:** Elaboración propia.

Adicionalmente, se usan otros materiales reciclados de la finca como: paja o tierra para el fondo de la zanja, lonas o plásticos reutilizados para las paredes de la zanja, alambre y lazo para fijar las tuberías de entrada y salida.

Para las diferentes mezclas de carga del biodigestor, se usan los mismos costos en la fabricación del biodigestor, teniendo previamente disponible la cochera y un punto de almacenamiento de los desechos del café y esto debido a que el cálculo realizado contiene un mismo volumen total de diseño para todas las opciones de mezcla.

**Figura 3.** Esquema del Biodigestor familiar y la conducción del biogás a la cocina.



**Fuente:** Adaptado de Biodigestores familiares. Guía de diseño y manual de instalación. (p. 51), por J. M. Herrero, 2008, GTZ- Energía. Bolivia.

Finalmente, al respecto de la relación Carbono/Nitrógeno, se ha dicho que la relación de contenido de carbono y nitrógeno de las materias primas que se utilizarán para la digestión anaeróbica dentro del biodigestor influye en gran medida en la producción de biogás debido a que, según Montalván Angélica Auxiliadora (2015), “las bacterias

metanogénicas consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1, y concibe para el caso de estiércol fresco de cerdo una relación de 13:1, para el estiércol de vaca una relación de 25:1 y para la pulpa de café una relación de 20:1 según su estudio” (Montalván Angélica Auxiliadora, 2015, p. 36).

Sin embargo, por el contrario, otros estudios prácticos han documentado que la producción de biogás es más eficiente a partir del estiércol de cerdo, como es el caso de la guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares desarrollado por Jaime Martí Herrero (2008), donde para estimar la producción de biogás conociendo la carga diaria propone: “el uso de un “número mágico” que resulta de los conceptos de sólidos totales y volátiles y que multiplicado por la carga diaria se tendría una idea aproximada del biogás generado, y resulta sobresaliente que el número planteado para la producción de biogás a partir del estiércol de cerdo es mayor (51) que el planteado a partir de estiércol bovino (35.5)” (Herrero, 2008, p. 30).

## 5. CONCLUSIONES

El análisis teórico de la generación de biogás a partir de desechos vegetales y desechos animales, estima una aproximación de la cantidad de biogás que generaría cada opción de carga en un biodigestor, teniendo en cuenta la disponibilidad de esta en la Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral, del Municipio de Páramo, Santander.

La producción de biogás a partir de desechos de café, está condicionada por diversas variables, principalmente por variables directas como la cantidad de cultivo, la obtención de café cereza, la disponibilidad del desecho y los tiempos de producción.

En el caso de los desechos de café, según la teoría la pulpa de café representa un 43.6% y el mucilago un 14.9% del total de la cosecha,

razón por la cual su uso en biodigestores sería una buena solución a la disposición final de esta, con el valor agregado de producción de biogás.

En la finca “Villa Juliana” se tiene un área de 1.25 hectáreas cultivadas de café, con siete mil plantas que producen 3813,25 kg de pulpa de café durante los meses de producción, lo que representa una disponibilidad diaria de 42.37 kg de carga para el biodigestor.

Para el cálculo, se usó un diez por ciento de la disponibilidad diaria de desechos de café resultando una producción de 141.75 litros diarios de biogás.

Con respecto a la producción de biogás con carga de estiércol porcino, es necesario contar con dos cerdos de 70 kg para obtener la misma cantidad de carga de desechos de café; este tipo de carga está condicionado al tipo de alimento del animal, siendo más óptimo la alimentación con residuos orgánicos debido a que produce mayor número de bacterias. El resultado obtenido de acuerdo, a la producción de biogás con desechos porcinos es de 289.17 litros diarios de biogás.

Se determina de manera teórica que, en la Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral, del Municipio de Páramo, Santander, teniendo en cuenta sus condiciones de temperatura, la mayor cantidad de biogás producido se obtiene de la carga diaria del biodigestor con desechos de origen animal, más exactamente con estiércol porcino con un tiempo de retención de treinta y siete días. El aumento en la producción representa un 104 % con relación a la producción con desechos de café.

Se obtuvo como segundo mejor resultado en producción de biogás una carga diaria del biodigestor producto de la mezcla del setenta por ciento de estiércol porcino y el treinta por ciento de desechos del café, con lo cual se reduciría el número de cerdos utilizados y se obtendría 244.97 litros de biogás diario.

En tercer lugar, con una mezcla del cincuenta por ciento de desechos de café y cincuenta por ciento de estiércol porcino, se obtiene 215.84 litros de biogás diario.

Finamente una mezcla del setenta porciento de desechos de café con el treinta por ciento de desechos porcinos, se obtiene 185.95 litros de biogás diario.

De acuerdo, a los resultados obtenidos la decisión del tipo de carga del biodigestor dependerá de condiciones como: la época de cosecha del café, de la disponibilidad de animales de la granja y la demanda de biogás de la finca, pues se aclara que el presente análisis está hecho a escala y se usan datos de la cosecha de café existente en la finca “Villa Juliana”.

Se pudo concluir que las indicaciones recurrentes de los diferentes autores consultados, coinciden en la implementación de biodigestores tubulares, usando polietileno tubular y accesorios de PVC que en conjunto resultan en un menor costo de construcción que para el caso propuesto se calculó en seiscientos treinta y nueve mil setecientos pesos, correspondiente a los materiales a utilizar.

El uso de biodigestores tubulares, es un sistema que permite la generación de biogás a partir de desechos de café y desechos porcinos contribuyendo con la disminución del impacto ambiental que causan dichos desechos en su disposición directa al suelo y agua, se convierte en una alternativa de sostenibilidad, progreso y economía en las comunidades campesinas.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Amante-Orozco, A., Martínez-Esquivel, R., Rössel-Kipping, E. D., Pimentel-López, J., García-Herrera, E. J., & Gómez-González, A. (abril 2019). Digestión anaerobia de estiércol de ovino para producir biogás y bioabono.

- Agroproductividad Vol. 12 Num. 4, 39-43.*
- Arcila O, F. (1979). Produccion de biogas a base de pulpa de café. *CENICAFE*, 17.
- Calle Velez, H. (1974). Como producir gas combustible con pulpa de café. *Boletin Tecnico No. 3*, 7-8.
- Calle Velez, H. (1977). Subproductos del café. *CENICAFE*, 84.
- Campos Cuni, B. (2011). Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino. *Ciencias Tecnicas Agropecuarias, Vol 20, No. 2*, 37-41.
- CAS. (1 de Noviembre de 2021). *Corporacion Autonoma Regional de Santander*. Obtenido de Corporacion Autonoma Regional de Santander: <http://cas.gov.co/index.php>
- Castro Molano, L. d., Parrales Ramirez, Y. A., & Escalante Hernandez, H. (2019). Co-digestión anaerobia de estiércoles bovino, porcino y equino como alternativa para mejorar el potencial energético en digestores domésticos. *Revista ION*, 9.
- Comite De Cafeteros De Santander. (2021). *santander.federaciondecafeteros.org*. Obtenido de [santander.federaciondecafeteros.org](https://santander.federaciondecafeteros.org/caffe-de-santander/): <https://santander.federaciondecafeteros.org/caffe-de-santander/>
- Consejo Nacional De Politica Economica Y Social. (21 de noviembre de 2016). *DNP*. Obtenido de DNP: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>
- FAO. (2019). *Guia teorico-practica sobre el biogas y los biodigestores*. Buenos Aires, Argentina: FAO.
- Gobierno de la Provincia de Santa Fe. (S.f.). Biodigestores y operacion de plantas de biogás. En G. d. Santa Fe, *Operacion y mantenimiento de biodigestores* (pág. 1). Provincia de Santa Fe, Argentina: Academia de la renovable.
- Google Earth Pro. (29 de noviembre de 2021). *Google Earth Pro*. Obtenido de Google EarthPro:[https://earth.google.com/web/@4.00000000,-72.00000000,11002532.62566398a,0d,35y,-0.0000h,0.0000t,0.0000r?utm\\_source=earth7&utm\\_campaign=vine&hl=es-419](https://earth.google.com/web/@4.00000000,-72.00000000,11002532.62566398a,0d,35y,-0.0000h,0.0000t,0.0000r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=es-419)
- Herrero, J. M. (2008). *Biodigestores familiares. Guia de diseño y manual de instalación*. La Paz, Bolivia: GTZ- Energía. Bolivia.
- Montalván Angélica Auxiliadora, Z. R. (Mayo de 2015). Produccion de biogas a partir de la pulpa de café con proptotipo de generador electrico. Nicaragua: Universidad Nacional de Ingenieria.
- Red BioLAC. (23-26 de abril de 2016). *secureservercdn.net*. Obtenido de [secureservercdn.net](https://secureservercdn.net/198.71.233.129/kvj.0fe.myftpupload.com/wp-content/uploads/2020/04/Plan-Estrat%C3%A9gico-Red-BioLAC-2016-2025.pdf): <https://secureservercdn.net/198.71.233.129/kvj.0fe.myftpupload.com/wp-content/uploads/2020/04/Plan-Estrat%C3%A9gico-Red-BioLAC-2016-2025.pdf>
- Rodriguez Valencia, N., & Zambrano Franco, D. A. (2010). Los subproductos del cafe: Fuente de energía renovable. *CENICAFE AVANCES TECNICOS* 393, 2.
- Rodriguez, N., & Zambrano, D. (2010). Los subproductos del café: Fuente de energía renovable. *CENICAFE*, 1-8.