

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Química

**Obtención de fibras naturales y subproductos líquidos a partir de biomasa
mediante un proceso de explosión con vapor, análisis de propiedades y
potenciales usos**

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Químico

Autor:

Carlos Francisco Ávila Orellana

Erika Fernanda Gualpa Brito

Director:

Tsai García Pérez

ORCID:  0000-0002-1580-1770

Cuenca, Ecuador

2024-11-05

Resumen

La valorización de desechos agrícolas es un tema de creciente relevancia. El presente trabajo se centró en la obtención y caracterización de fibras naturales y subproductos líquidos a partir de hojas de banano (*Musa paradisiaca*) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), utilizando el proceso de explosión con vapor (EV). para luego analizar sus propiedades y posibles aplicaciones. Se emplearon tiempos de residencia de 1 segundo (denotado como B1 y C1 para banano y caña, respectivamente) y 10 minutos en el proceso (B10 y C10). Las fibras obtenidas presentaron un rendimiento del 3.59% para B1, 3.10% para B10, 2.79% para C1 y 2.67% para C10. Los valores de carbono orgánico en las fibras extraídas fueron superiores al material original, con B1 alcanzando un 59.29% y C10 un 50.08%, lo que sugiere buena estabilidad estructural y potencial para aplicaciones en biocompuestos. El análisis dimensional y de biodegradabilidad de composites HDPE-fibra indica una buena estabilidad dimensional de fibra de banano en ambientes de alta humedad y biodegradabilidad de 10% (para C10). En cuanto a la composición química, las fibras mostraron concentraciones de nitrógeno entre 1.58 a 1.98%, fósforo y potasio entre 0.436 a 3.512 ppm, lo que limita su uso como fertilizante. Por otra parte, los subproductos líquidos resultantes de cada tratamiento no contenían nitrógeno, y el contenido de fósforo y potasio fue 0.103 a 0.680 ppm, descartando también su uso como fertilizantes. Sin embargo, todos los líquidos mostraron potencial fitotóxico con un índice de germinación de semilla entre 0.00 a 22.19%, indicando potencial uso como herbicidas.

Palabras clave del autor: explosión con vapor, fibras lignocelulósicas, fitotoxicidad



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

The valorization of agricultural waste is an increasingly relevant topic. This study focused on the extraction and characterization of natural fibers and liquid byproducts from banana leaves (*Musa paradisiaca*) and sugarcane (*Saccharum officinarum*), using the steam explosion (SE) process. The investigation aimed to analyze the properties and potential applications of the products. Residence times of 1 second (referred to as B1 and C1 for banana and sugarcane, respectively) and 10 minutes (B10 and C10) were used in the process. The extracted fibers showed yields of 3.59% for B1, 3.10% for B10, 2.79% for C1, and 2.67% for C10. The organic carbon content in the extracted fibers was higher than in the original material, with B1 reaching 59.29% and C10 reaching 50.08%, suggesting good structural stability and potential for use in biocomposites. The dimensional and biodegradability analysis of HDPE-fiber composites indicated good dimensional stability of banana fibers in high-humidity environments and a biodegradability rate of 10% (for C10). Chemically, the fibers exhibited nitrogen concentrations between 1.58% and 1.98%, and phosphorus and potassium concentrations ranging from 0.436 to 3.512 ppm, limiting their potential use as fertilizers. Additionally, the liquid byproducts from each treatment did not contain nitrogen, and phosphorus and potassium levels ranged from 0.103 to 0.680 ppm, ruling out their use as fertilizers. However, all the liquid byproducts demonstrated phytotoxic potential, with seed germination indices between 0.00% and 22.19%, indicating their potential as herbicides.

Author keywords: steam explosion, lignocellulosic fiber, phytotoxicity



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

Dedicatoria.....	9
Agradecimientos.....	11
1. Introducción:	12
Objetivos.....	13
Objetivo General	13
Objetivos específicos.....	13
2. Marco teórico	14
2.1 Agricultura y economía circular	14
2.1.1 Agricultura en Ecuador.	14
2.1.2 Economía circular en la agricultura	15
2.1.3 Gestión de residuos agrícolas en Ecuador	17
2.2 Biomasa lignocelulósica en la industria azucarera y del banano	19
2.2.1 Definición y composición.....	19
2.2.2 Macronutrientes presentes en la biomasa provenientes de las hojas de caña de azúcar y de banano.....	24
2.3 Proceso de explosión con vapor	27
2.3.1 Principios de la explosión con vapor en materiales lignocelulósicos.....	27
2.4 Fibras obtenidas por el proceso de explosión de vapor. Compuestos Polímero-Fibra	32
2.4.1 Definición y tipos de fibras naturales	32
2.4.2 Biodegradabilidad de las fibras tratadas	33
2.4.3 Incorporación de fibras lignocelulósicas en compuestos poliméricos.....	39
2.5 Subproductos líquidos obtenidos por explosión con vapor. Análisis de fitotoxicidad	44
2.6 Caracterización de N, K y P de subproductos líquidos resultantes de proceso de explosión con vapor.....	47
3. Materiales y métodos	49
3.1 Proceso de explosión con vapor	49
3.1.1 Obtención de la materia prima	49
3.1.2 Pretratamiento.....	50
3.1.3 Extracción de la fibra y obtención del subproducto líquido mediante explosión con vapor	50
3.2 Análisis de las fibras obtenidas por explosión con vapor.....	51
3.2.1 Análisis del contenido de carbono orgánico de las fibras	51
3.2.2 Análisis del contenido nutricional de las fibras	52

3.2.3	Evaluación de la biodegradabilidad de fibras obtenidas mediante el proceso de explosión con vapor.....	56
3.2.4	Evaluación de la biodegradabilidad de materiales compuestos HDPE-Fibra .	64
3.2.5	Análisis de la Absorción de Agua en compuesto HDPE-fibra.....	64
3.3	Análisis de los líquidos obtenidos por explosión con vapor	65
3.3.1	Análisis del contenido nutricional de los líquidos.....	66
3.3.2	Evaluación de la fitotoxicidad de los líquidos	66
4.	Resultados y discusión.....	68
4.1	Obtención de fibras y subproductos líquidos a partir del proceso de explosión con vapor	68
4.2	Contenido de carbono orgánico en fibras	71
4.3	Contenido nutricional de las fibras para fines agrícolas.....	74
4.4	Efecto de las fibras tratadas en la biodegradabilidad y estabilidad dimensional de compuestos HDPE-Fibra.....	75
4.5	Contenido nutricional y fitotoxicidad de los subproductos líquidos.....	88
5.	Conclusiones:.....	92
6.	Recomendaciones.....	93
7.	Referencias.....	94

Índice de figuras

Figura 1. Estructura de la biomasa lignocelulósica (Zhang et al., 2021).	20
Figura 2. Estructura de la celulosa (Redwan et al., 2017).	22
Figura 3. Estructura de la hemicelulosa (Redwan et al., 2017).....	23
Figura 4. Estructura de la lignina (Redwan et al., 2017).....	23
Figura 5. Proceso de pretratamiento de la biomasa lignocelulósica mediante explosión con vapor y sus efectos en la composición de la biomasa.....	29
Figura 6. División del material pretratado y posibles operaciones de procesamiento (Duque et al., 2016).....	32
Figura 7. Ubicación Finca Alejita (Google Maps - ©2024 Google).....	49
Figura 8. Ubicación viveros Paute (Google Maps - ©2024 Google).....	50
Figura 9. Equipo de explosión con vapor.....	51
Figura 10. Proceso de caracterización del contenido de carbono en fibras tratadas y biomasa no tratada.	52
Figura 11. Proceso de caracterización del contenido de nitrógeno en fibras tratadas y subproductos líquidos.....	54
Figura 12. Proceso de caracterización del contenido de fósforo de la fibra tratada y del subproducto líquido.....	55
Figura 13. Proceso de caracterización de potasio de las fibras tratadas y subproductos líquidos.	56
Figura 14. Toma de una muestra de suelo.	58
Figura 15. Potenciómetro Thermo Scientific Orion Versa Star Pro.	59
Figura 16. Proceso de análisis de humedad de la muestra de suelo seleccionada	59
Figura 17. Tamizado de la muestra de suelo.....	60
Figura 18. Diagrama de flujo correspondiente al procedimiento para análisis de biodegradabilidad de fibras tratadas.....	63
Figura 19. Diagrama de flujo del proceso de estabilidad dimensional.....	65
Figura 20. Disposición de semillas en placas de Petri utilizadas para el control y con los subproductos líquidos.....	67
Figura 21. Fibras y subproductos líquidos obtenidos mediante explosión con vapor tras dos tiempos de residencia diferentes, a partir de biomasa lignocelulósica. Las muestras corresponden a: (a) Hojas de banano tratadas por 1 segundo, (b) Hojas de banano tratadas por 10 minutos, (c) Hojas de caña de azúcar tratadas por 1 segundo, y (d) Hojas de caña de azúcar tratadas por 10 minutos.....	68
Figura 22. Fibras obtenidas a) Fibra hoja de banano tiempo de residencia 1 segundo; b) Fibra hoja de banano tiempo de residencia 10 minutos; c) Fibra hoja de caña tiempo de residencia 1 segundo; d) Fibra hoja de caña tiempo de residencia 10 minutos.....	69
Figura 23. Curvas de biodegradabilidad: (a) fibras y compuestos HDPE-fibra de hoja de banano (b) fibras y compuestos HDPE-Fibra de hoja de caña.	79
Figura 24. Representación gráfica del porcentaje de pérdida durante exposición al suelo: (a) Hoja de banano, Fibras de banano y compuestos HDPE-Fibra de hoja de banano (b) Hoja de caña, fibras de caña y compuestos HDPE-Fibra de hoja de caña.	82
Figura 25. Propiedades de HDPE-Fibra: (a) Absorción de agua y (b) Espesor de hinchazón.	84
Figura 26. Resultados de fitotoxicidad en los líquidos.....	89

Figura 27. Determinación del efecto herbicida de líquidos residuales del proceso de explosión con vapor en semillas de <i>Taraxacum officinale</i>	91
--	----

Índice de tablas

Tabla 1. Composición de la biomasa de las hojas de banano y hojas de caña de azúcar... 23	23
Tabla 2. Ubicación y coordenadas de las muestras de suelo analizadas. 57	57
Tabla 3. Grupos de muestras analizados en el ensayo..... 60	60
Tabla 4. Peso inicial, peso final y rendimiento en peso de las fibras obtenidas mediante explosión con vapor..... 70	70
Tabla 5. Análisis de carbono orgánico en materias primas y fibras obtenidas..... 71	71
Tabla 6. Contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en las fibras de hojas de banano y caña de azúcar tratadas mediante explosión con vapor. 74	74
Tabla 7. Valores de pH en muestras de suelo. 75	75
Tabla 8. Pesos obtenidos para el cálculo de la humedad..... 77	77
Tabla 9. Porcentaje de humedad de la muestra de suelo seleccionada..... 77	77
Tabla 10. Resultados obtenidos de pH, nitrógeno, fósforo y potasio en subproductos líquidos de la extracción de fibras de hojas de caña y banano mediante explosión con vapor. 88	88

Dedicatoria

A Dios por ser el guía en cada paso que doy, por darme la sabiduría en cada tropiezo, por darme la fortaleza para vencer al fracaso y por mantenerme humilde en cada victoria.

A mi madre, Patricia, por toda la energía y el tiempo que ha dedicado a enseñarme, protegerme, aconsejarme y educarme, por ser el apoyo incondicional durante toda mi vida y por ese amor incondicional que mis palabras no pueden expresar, porque a través de ella he descubierto lo que es el amor incondicional.

A mis abuelitos, Piedad y Aurelio, por criarme con ese amor invaluable, por enseñarme a cómo enfrentar la vida, por enseñarme a actuar con valores y por crear al hombre que hoy les dedica estas palabras.

A mi familia, en especial a mi tía María Elena y mis primos Kevin y Pablo, por demostrarme el significado de la perseverancia y por brindarme siempre su apoyo.

A mi querido Jack, por alegrarme en los días malos, por acompañarme en aquellas noches frías, por ser mi impulso cada día y por enseñarme que el vínculo que se crea con un animal es único y es uno de los sentimientos más puros que existen.

A mis amigos por su valiosa amistad, por compartir tantos momentos felices, por ser luz y apoyo en los días difíciles.

Carlos

Dedicatoria

A Dios, por sostenerme en cada segundo de mi vida, por darme la fuerza para continuar y la luz para no perderme.

A mis padres, Laura y Víctor, pilares de mi vida, por su amor sin condiciones, por ser siempre mi refugio.

A mi hermana Sandrita, mi pequeña inspiración, por recordarme lo que es soñar y nunca rendirse.

A mis amigos, por enseñarme que la verdadera amistad está en estar presentes, por ser el reflejo de la confianza y el cariño constante que hace que cada paso sea más ligero.

A mi querida Eli, mi pequeña compañera de noches interminables. Tus suaves ronroneos me recordaban que, incluso en los momentos más solitarios, no estaba sola.

Erika

Agradecimientos

A la Ing. Tsai García-Perez Ph.D., nuestra tutora, por su confianza y orientación en cada etapa de este proyecto. Su conocimiento, profesionalismo y dedicación nos brindaron el apoyo necesario para enfrentar los retos con claridad y determinación. Gracias por compartir no solo su experiencia, sino también las herramientas necesarias para alcanzar nuestros objetivos con éxito.

Al proyecto “Aprovechamiento de desechos lignocelulósicos agroindustriales y materiales poliméricos de reciclaje para la producción de compósitos plástico-madera y bioetanol” financiado por el Departamento de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC) y la Universidad Politécnica Salesiana, por brindarnos la oportunidad de ser parte de esta investigación y permitirnos aportar nuestro pequeño grano de arena al conocimiento científico.

Al Ing. Jaime Cuenca, por su constante disposición para ayudarnos, por su guía y apoyo. Por su habilidad para transmitir conocimientos y su disposición para resolver nuestras dudas fueron fundamentales en momentos clave de este proyecto.

Al Ing. Eduardo José Chica, Ph.D., Decano de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, por su generosidad al brindarnos su valioso tiempo, así como la sabiduría y experiencia compartidas que nos inspiraron a alcanzar nuevas metas en nuestra formación profesional, que han sido pilares en la realización de este trabajo de titulación.

A la Dra. Carmen Castillo Carrillo del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) por su guía en el estudio de fitotoxicidad, la información detallada y las orientaciones brindadas fueron fundamentales para enriquecer nuestro entendimiento y avanzar con determinación en nuestra investigación.

A la Universidad de Cuenca y a los docentes de la carrera de Ingeniería Química, por brindarnos su acogida, abrirnos sus puertas y guiarnos en nuestra formación profesional. Agradecemos profundamente por los conocimientos impartidos, el apoyo constante y los desafíos que nos impulsaron a mejorar cada día, permitiéndonos crecer tanto personal como profesionalmente en el camino hacia la excelencia.

Al personal de los distintos laboratorios de la Universidad de Cuenca y Universidad Politécnica Salesiana por brindarnos su apoyo y apertura en la fase experimental de nuestro trabajo de titulación.

Carlos y Erika

1. Introducción

La agricultura juega un papel fundamental en la economía de Ecuador, representando un porcentaje significativo del Producto Interno Bruto (PIB) del país. En el año 2023, el sector agrícola constituyó el 7.68% del PIB, evidenciando la importancia de esta actividad económica en la vida nacional (Statista, 2023). Sin embargo, junto con la prosperidad agrícola, surgen desafíos ambientales considerables debido a la generación masiva de biomasa residual, especialmente en cultivos permanentes como la caña de azúcar y el banano, los cuales abarcan un 26,15% de producción, de la superficie dedicada a actividades agropecuarias y son responsables de una producción anual significativa de biomasa residual. Estos residuos, comúnmente considerados como desechos, representan tanto un reto ambiental como una oportunidad para implementar prácticas de economía circular, las cuales podrían transformar la biomasa lignocelulósica en recursos valiosos para diversas industrias. La economía circular, un concepto que ha ganado relevancia en la administración sustentable de recursos, impulsa la reducción, reutilización y reciclaje de materiales, con el objetivo de desvincular el crecimiento económico del agotamiento de recursos y la degradación ambiental. Este modelo económico es esencial en el contexto de la agricultura ecuatoriana, no solo para mejorar la gestión de desechos, sino también alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible y a su vez contribuir al desarrollo sostenible de la agricultura ecuatoriana.

En particular, los desechos agrícolas producidos por las hojas de caña de azúcar y banano, comúnmente desechados tras la cosecha, representan una fuente significativa de biomasa lignocelulósica. Por medio de técnicas de tratamiento como la explosión con vapor, permiten la valorización de los desechos, transformándolos en recursos para la fabricación de bioetanol, fibras para la industria papelera, y otros productos de alto valor añadido. La implementación de estas tecnologías no solo contribuye a la sostenibilidad económica, sino que también aborda los problemas ambientales asociados con la agricultura, como la contaminación del aire y la erosión del suelo.

Por lo tanto, al enfocarse en el potencial de aprovechamiento de los residuos lignocelulósicos en Ecuador, con énfasis en la biomasa generada por los cultivos de caña de azúcar y banano. Se explorarán los procesos de pretratamiento, como la explosión con vapor, y sus implicaciones para la economía circular en la agricultura ecuatoriana, con el objetivo de contribuir a la gestión sostenible de los recursos agrícolas y al desarrollo de una bioeconomía en el país.

Objetivos

Objetivo General

Extraer fibras naturales y subproductos líquidos mediante tratamiento de biomasa por un proceso de explosión con vapor, así como el análisis de sus propiedades y potenciales usos.

Objetivos específicos

- Producir fibras naturales y subproductos líquidos a través de procesos de explosión con vapor, utilizando como materias primas las hojas de banano y caña de azúcar.
- Evaluar la biodegradabilidad de la fibra tratada y su impacto en la estabilidad dimensional de compuestos plástico-fibras.
- Caracterizar el subproducto líquido resultante mediante análisis del contenido de N, K y P y analizar su idoneidad para posibles usos agrícolas.

2. Marco teórico

2.1 Agricultura y economía circular

2.1.1 Agricultura en Ecuador.

En Ecuador, el sector agrícola representó aproximadamente el 7.68% del producto interno bruto (PIB) en 2023 (Statista, 2023), en el año 2018, se evidenció una generación de cultivos agrícolas que superó los 23 mil millones de kilogramos, especialmente en diez principales cultivos del país: caña de azúcar, banano, palma aceitera, maíz duro seco, plátano, papa, cacao, arroz, naranja y brócoli, representando en conjunto el 59,46% de la generación global (INEC, 2023). Sin embargo, el éxito agrícola también conlleva desafíos ambientales significativos por la generación gigantesca de biomasa residual. Según Guerrero et al., (2016) debido a la poda de tallos y otros desechos orgánicos, los cultivos permanentes, en particular la caña de azúcar y el banano, producen una cantidad considerable de biomasa.

Los cultivos de caña de azúcar y banano abarcan aproximadamente el 26,15% de la superficie con actividades agropecuarias, siendo estos los cultivos de mayor producción a nivel nacional. INEC (2023) anunció que la generación de banano logró los 6,1 millones de toneladas métricas en el 2022, mientras que la caña de azúcar alcanzó los 7,7 millones de toneladas métricas, generando una cantidad de biomasa residual. La vida productiva del banano, con un ciclo de 10 a 12 meses, y del plátano, que da fruto una única vez, resulta en la generación de toneladas de desechos, incluyendo frutas no aprovechables, cáscaras, racimos vacíos, hojas, pseudotallos y rizomas (Abdullah et al., 2013). Cada tonelada de plátano recolectada contribuye significativamente a la biomasa residual, incluyendo pseudotallos, raquis y hojas (Fernandes et al., 2020). Las hojas de caña de azúcar, por otro lado, se convierten en residuos agrícolas después de la cosecha, siendo un componente fibroso que representa aproximadamente el 18% de la materia seca (Palaniyappan, 2016). Su quema al aire libre contribuye a problemas medioambientales como el calentamiento global y la contaminación del aire. Después de la cosecha, la biomasa lignocelulósica, que incluye pseudotallo, hojas y raquis, generalmente se deja en el suelo para su utilización como materia orgánica. Sin embargo, en ciertos casos, esta práctica podría derivar en problemas, sirviendo como un posible foco infeccioso o resultando en la eliminación directa en vertederos de residuos. En este sentido, se vislumbra una oportunidad prometedora para mejorar la gestión de esta biomasa. Una estrategia innovadora implicaría el aprovechamiento de una fracción de esta biomasa lignocelulósica, transformándola en fibra, lo que podría tener aplicaciones versátiles en diversas industrias, como la papelera, la fabricación de cuerdas, el

embalaje de alimentos, la creación de tableros o la producción textil (Subagyo y Chafidz, 2020).

La biomasa destaca como un recurso renovable fundamental, que puede ser utilizado para la creación de una variedad de productos con valor agregado y como generador de energía. La implementación de la bioeconomía y el desarrollo sostenible son impulsados activamente por este uso. En este contexto, la agricultura toma un papel crucial, ya que es uno de los mayores productores de biomasa y un insumo vital para la bioeconomía (Lamine et al., 2023). Sin embargo, si los productos, denominados desechos agrícolas, no llegan a ser tratados llegarán a tener graves impactos ambientales, tales como: infertilidad del suelo, eliminación de comunidades microbianas beneficiosas, contaminación del aire, alta emisión de gases de efecto invernadero, la crisis climática y la erosión del suelo. Una gestión ineficiente de los desechos agrícolas limita el potencial de la agricultura para desarrollarse de manera sostenible. La incorporación de una economía circular en el sector agrícola se presenta como una oportunidad innovadora para optimizar el aprovechamiento de recursos y reducir los efectos ambientales, especialmente en Ecuador, donde la agricultura es un pilar económico esencial (Banco Mundial, 2020). La urgencia de implementar estrategias innovadoras y sostenibles para abordar los problemas de la agricultura y sus desechos, tanto a nivel global como en Ecuador, se destaca debido a estos obstáculos.

2.1.2 Economía circular en la agricultura

La definición del concepto de economía circular es polifacética y abierta a varias interpretaciones y definiciones. Según García-Barragán (2019) propone una perspectiva matemática, definiéndose como una función que maximiza el valor de los materiales utilizados en la producción. Desde el punto de vista del lenguaje, se compara con la economía lineal, que convierte los recursos en residuos y promueve la destrucción ecológica. Boulding (1966) describe una economía lineal como un sistema unidireccional.

La economía circular está vinculada al ciclo de recursos y se extiende a conceptos como la simbiosis industrial y la economía de servicios, que buscan utilizar los desechos como recursos y desacelerar los ciclos de uso (Prieto-Sandoval et al., 2017). La economía circular se define por su enfoque restaurativo y preventivo en la gestión de los recursos. Busca diseñar sistemas industriales que minimicen la producción de residuos y reparen daños previos al medio ambiente. La economía circular tiende a dar un enfoque autosostenible donde se promueve la sostenibilidad, recuperación y valorización de los residuos, con el fin de prevenir la generación de desperdicios siempre que sea posible y a su vez gestionar de mejor manera estos residuos (Kirchherr et al., 2017).

El objetivo final de la economía circular es desvincular el crecimiento económico del agotamiento de los recursos y la degradación ambiental. Busca reducir, reutilizar, reciclar y recuperar materiales en todos los procesos, adoptando un enfoque de las 4R. A su vez, este modelo de economía contribuye a lograr significativamente cuatro objetivos de desarrollo sostenible (ODS): el ODS 2, ODS 11; ODS 12; y ODS 13 (Lamine et al., 2023). En su esencia, busca un equilibrio entre el desarrollo económico y la protección del medio ambiente y los recursos, abogando por una gestión eficiente de los recursos y una mejora de la ecoeficiencia. Este enfoque holístico destaca la necesidad de un cambio sistémico y la importancia del desarrollo sostenible y la calidad ambiental (Murray, 2017; Geisendorf, 2018; Kirchherr, 2017). Una economía que no tiene un efecto neto sobre el medio ambiente y restaura cualquier daño causado durante todo el proceso de producción y la vida del producto, es la definición de economía circular (PNUMA, 2006).

- Aplicación de la economía circular en la agricultura.

Se presenta como una estrategia integral para abordar los desafíos globales la transición hacia una economía circular en la agricultura. Se destaca que productos agrícolas pueden transformarse en materias primas con valor añadido, estableciendo así un enfoque circular (Sultanova, 2022). Este cambio no solo aborda problemas como la escasez de alimentos, sino que también afronta cuestiones medioambientales y de generación de empleo a través de la cadena de reciclaje. La eficiencia de recursos y la reducción de desechos son componentes esenciales para la implementación exitosa de la economía circular en la agricultura. Este enfoque implica la utilización de biomateriales y aguas residuales tratadas, destacando su potencial tanto en aspectos económicos como en la gestión sostenible de recursos (Antoniou et al., 2019).

Existe la necesidad de unir tecnologías avanzadas y prácticas sostenibles al enfocarse en modelos de negocio circulares en la agricultura. La transición a modelos de negocio circulares no se limita a optimizar operaciones existentes, sino que implica el desarrollo de nuevos productos y servicios, ingreso a mercados inexplorados, cambios en cadenas de valor y revisión de fuentes de ingresos (Strapchuk, 2022). La economía circular se convierte en una herramienta crucial en la solución de problemas relacionados con el uso de recursos naturales y el cuidado del medio ambiente. Su implementación no solo mejora la eficiencia energética y de recursos, sino que también minimiza los riesgos ambientales asociados con los desechos agrícolas, contribuyendo a los objetivos de desarrollo sostenible tanto para la industria como para la sociedad en general (Litvak y Litvak, 2023).

La economía circular logra representar una táctica para ahorrar recursos importantes y disminuir los impactos ambientales negativos de las actividades agrícolas mientras se optimiza el desempeño económico (Velasco-Muñoz et al., 2021). Las investigaciones abordan diversos elementos cruciales que deben ser tenidos en cuenta al aplicar el concepto de economía circular en el sector agrícola. La piedra angular en la toma de decisiones y prácticas económicas es la eficiencia de los recursos, buscando asegurar un mayor valor agregado y la retención de recursos dentro del sistema productivo durante el máximo tiempo posible. Alcanzar la eficiencia en los modelos de agricultura circular implica la optimización de procesos con el objetivo de reducir al mínimo, el uso de recursos y prevenir el desperdicio (Ruiz et al., 2019).

La economía circular en la agricultura busca generar prosperidad económica y social al mismo tiempo que preserva el medio ambiente al reducir la contaminación (Burgo-Bencomo et al., 2019). La agricultura circular debería de ser una parte importante de la economía, proteger la biodiversidad y ayudar a garantizar la seguridad alimentaria. Por lo tanto, la aplicación de la economía circular en el sector agrícola, se refiere a un conjunto de prácticas destinadas a garantizar la sostenibilidad económica, ambiental y social mediante el uso eficaz y eficiente de los recursos en todas las etapas de la cadena de valor, así como la regeneración y la biodiversidad de los agroecosistemas y los ecosistemas circundantes (Velasco-Muñoz et al., 2021). Específicamente en nuestra investigación, nos enfocamos en los residuos agrícolas generados por las hojas de caña y banano, comúnmente descartadas tras la cosecha de los frutos en Ecuador. Estos residuos, predominantemente compuestos por hojas de caña y banano, representan un desafío ambiental significativo y, al mismo tiempo, una valiosa oportunidad para la implementación de economía circular.

2.1.3 Gestión de residuos agrícolas en Ecuador

- Tipos de residuos agrícolas

Los residuos agrícolas son un subproducto inevitable de diversas actividades como el cultivo de alimentos, ganadería, el procesamiento de alimentos y la pesca (Yu et al., 2019). Estos desechos se presentan en forma sólida, líquida o como purines, e incluyen elementos como restos de cultivos, estiércol animal y subproductos del procesamiento de alimentos. A nivel global, se calcula que existen alrededor de 998 millones de toneladas de residuos agrícolas cada año, de los cuales los desechos orgánicos constituyen hasta un 80% (Patil, 2020). Una gestión inadecuada de estos residuos puede ocasionar serios riesgos para la salud pública y el ambiente que nos rodea. Sin embargo, estos desechos también albergan nutrientes valiosos y, con un adecuado manejo, pueden convertirse en productos útiles mediante

diversas estrategias, como las "4R" y aplicaciones biotecnológicas (Thummar, 2024; Maji et al., 2020). Implementar sistemas de gestión de desechos agrícolas eficientes y convertir estos desechos en subproductos valiosos puede reducir los problemas ambientales y mejorar la seguridad alimentaria global. Ecuador produce una variedad significativa de residuos agrícolas con un alto potencial de valorización. Las principales fuentes de estos desechos provienen de las industrias del banano, plátano, maíz, arroz, caña de azúcar y piña (Riera et al., 2023). Tales residuos presentan un pH ácido, baja conductividad eléctrica, y un alto contenido de materia orgánica. Los residuos de origen animal exhiben mayor contenido de nutrientes y metales pesados en comparación con los vegetales. Hay potencial para la producción de nanocelulosa a partir de estos desechos; sin embargo, la oportunidad no se ha explotado en su totalidad y aún se necesitan más investigaciones para aprovechar estos residuos (Gavilanes-Terán et al., 2015). Asimismo, para mejorar la gestión de estos residuos, se propuso un enfoque basado en la toma de decisiones a partir de múltiples criterios. Este sistema armoniza el proceso de jerarquía analítica con los sistemas de información geográfica y toma en cuenta la disponibilidad de residuos, el potencial de industrialización, el impacto socioambiental y las características geomorfológicas de las regiones de producción (Riera et al., 2023). Finalmente, la adición de tecnologías emergentes y prácticas de economía circular permitiría aumentar la sostenibilidad y rentabilidad del manejo de residuos agrícolas en Ecuador.

Uno de los que se sabe que contribuye enormemente al crecimiento del suministro alimentario en todo el mundo es el aumento de la producción de productos agrícolas y otras actividades agrícolas. Sin embargo, la cantidad de productos que puede ser derivada de la productividad también ha resultado en una acumulación impactante de residuos. Según los agrónomos, los desechos agrícolas son materiales no deseados generados en las etapas de producción y procesamiento en las operaciones agrícolas que tienen muy poco valor económico en comparación con los gastos de recolección, transporte y procesamiento para su reutilización (Rasheed et al., 2024). Se proyecta que la acumulación anual mundial de desechos agrícolas supere los 7500 millones de toneladas. La mayoría de los residuos agrícolas producidos como subproductos de la producción agrícola se liberan al medio ambiente sin ser tratados, se queman a gran escala o se eliminan de manera indiscriminada. Esto resulta en el agotamiento de recursos, contaminación del suelo y el agua, incendios, así como problemas ecológicos y ambientales más graves. La gestión de las crecientes cantidades de residuos sólidos es una cuestión crucial relacionada con el desarrollo sostenible de la sociedad humana. La mayor parte (46 %) de los residuos sólidos son desechos orgánicos. Como resultado, los países en desarrollo deben tomar medidas inmediatas para abordar la contaminación ambiental causada por los desechos agrícolas. Por lo tanto, la gestión adecuada de los residuos sólidos

orgánicos es crucial (Noor et al., 2024). Por lo tanto, cada vez se reconoce más que los desechos agrícolas son una fuente útil para la producción de productos sostenibles, especialmente a partir de los componentes lignocelulósicos de las plantas.

- Potencial de aprovechamiento de los residuos lignocelulósicos

La biomasa lignocelulósica, especialmente los residuos agrícolas, ofrece una oportunidad significativa para la valorización y la producción de energía sostenible. Estos residuos pueden ser fraccionados para aislar celulosa, hemicelulosa y lignina para diversas aplicaciones, como la fabricación de papel y la biorrefinación (Jiménez y Rodríguez, 2010). La producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos es otra vía prometedora, aunque requiere superar la compleja degradación de la estructura lignocelulósica mediante diversos métodos de pretratamiento, hidrólisis y fermentación (Rosero et al., 2022).

La biomasa lignocelulósica representa una fuente renovable con múltiples aplicaciones en la generación de combustibles y productos químicos de alto valor (Suárez Matallana et al., 2022). Su aprovechamiento implica procesos biológicos y termoquímicos para descomponerla en sus componentes básicos, los cuales pueden ser convertidos en moléculas intermedias para aplicaciones industriales (Sifontes, 2019). El concepto de biorrefinería engloba estos procesos, aunque enfrenta retos como el alto consumo energético durante las fases de pretratamiento y la variabilidad en las materias primas. La biomasa lignocelulósica se presenta como una alternativa a los combustibles fósiles, con el potencial de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y abordar problemas relacionados con la gestión de residuos (Luzardo et al., 2023). Además, las fibras lignocelulósicas y sus componentes ofrecen posibilidades para avanzar en el desarrollo tecnológico sostenible en la creación de polímeros y materiales compuestos (Silva et al., 2009).

2.2 Biomasa lignocelulósica en la industria azucarera y del banano

2.2.1 Definición y composición

- Estructura de la biomasa lignocelulósica

El término "biomasa lignocelulósica" se refiere a la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico que provienen principalmente de la agricultura, la silvicultura y las industrias conexas, es una materia prima renovable que ayudará a reducir la dependencia de las materias primas fósiles. Los principales componentes de los materiales lignocelulósicos son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina. La celulosa es un componente

estructural clave de las paredes celulares, proporcionando fortaleza mecánica y estabilidad química a las plantas. La energía solar se absorbe a través del proceso de fotosíntesis y se almacena en forma de celulosa (Raven et al., 1992). La hemicelulosa es un copolímero de diferentes azúcares, pentosas y hexosas que también está presente en la pared celular de las plantas. La lignina es un polímero de compuestos conformado por unidades de fenilpropanoides que están compuestas de p-hidroxifenil (H), guaiacil (G) y siringil (S), derivadas de los alcoholes p-cumarílico, coniférico y sinapílico, respectivamente, (Imagen 1). Además de los tres compuestos químicos básicos que forman la lignocelulosa, el agua también está presente en el complejo. Asimismo, se pueden encontrar cantidades menores de proteínas, minerales y otros componentes en la composición de la lignocelulosa (Kirk-Otmer, 2001).

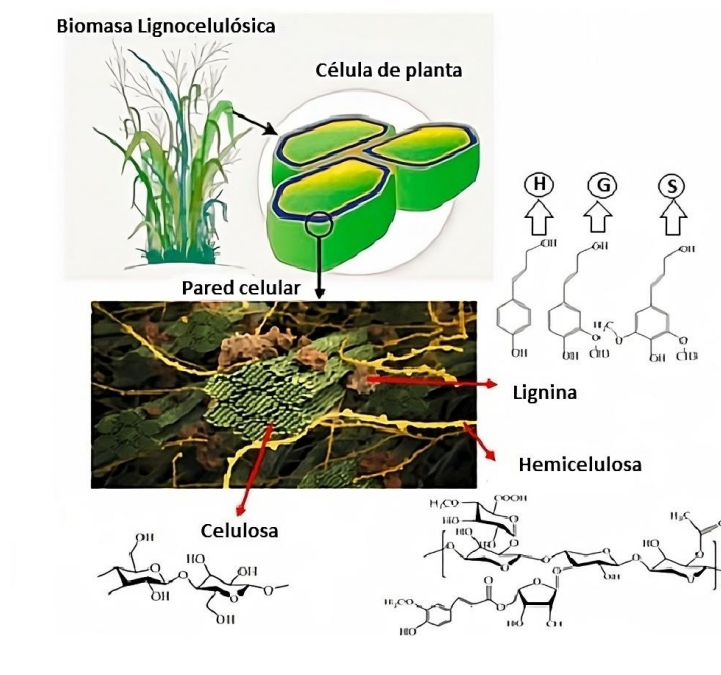


Figura 1. Estructura de la biomasa lignocelulósica (Zhang et al., 2021).

- Métodos de pretratamiento de la biomasa lignocelulósica

Para poder aprovechar la biomasa es necesario aplicar procesos mecánicos, biológicos y termoquímicos para acceder a sus componentes principales. A partir de los componentes principales se pueden producir moléculas plataforma que sirven como materia prima para obtener productos químicos de interés industrial. Los métodos mecánicos incluyen molienda, que reduce el tamaño de partícula para aumentar la relación superficie/volumen, y el pretratamiento ultrasónico, que utiliza ultrasonido para mejorar la hidrólisis enzimática (HE) de la celulosa, aumentando su tasa de hidrólisis en aproximadamente un 200% (Imai et al.,

2004). Sin embargo, la eficacia del ultrasonido en lignocelulosa aún requiere más investigación. En cuanto a los pretratamientos químicos, el tratamiento con agua caliente presurizada utiliza agua a alta temperatura (200-230 °C) y presión para disolver hemicelulosa y parte de la lignina, disolviendo entre el 40% y el 60% de la biomasa total. Aunque eficaz en la disolución de hemicelulosa y mejora la digestibilidad de la celulosa, puede generar ácidos como el ácido acético que se convierten en inhibidores como el furfural (Mok y Antal Jr, 1992). La hidrólisis ácida débil emplea ácidos diluidos a temperaturas entre 160-220 °C para liberar azúcares monoméricos a la hidrólisis de hemicelulosa, siendo eficiente en la liberación de azúcares y mejorando la digestibilidad enzimática. Sin embargo, los azúcares pueden degradarse en inhibidores como furfural y hidroximetilfurfural (HMF), y el ácido puede ser corrosivo (Kootstra et al., 2009). La hidrólisis ácida fuerte utiliza ácidos concentrados para la hidrólisis de celulosa, evitando la necesidad de enzimas posteriores, ofreciendo alta rendibilidad de azúcares monoméricos, pero con costos elevados debido a la corrosividad del ácido y la necesidad de reciclaje (Sun y Cheng, 2002).

El pretratamiento químico-mecánico combinado incluye la explosión con vapor (EV), que inyecta vapor saturado a alta presión en la biomasa, aumentando la temperatura a 160-260 °C y provocando una descompresión explosiva que degrada hemicelulosa y altera la matriz de lignina. Este método tiene la ventaja de bajo uso de productos químicos y consumo limitado de energía, mejorando la accesibilidad de la celulosa, aunque puede generar productos de degradación que inhiben procesos posteriores y su eficacia depende de condiciones como el tiempo de residencia y tamaño de partícula (Sun y Cheng, 2002; Ruiz et al., 2008). La explosión de fibra con amoníaco trata la biomasa con amoníaco líquido a alta temperatura y presión, seguido de una descompresión abrupta que reduce la lignina y descompone parcialmente la hemicelulosa, descristalizando la celulosa. Este método permite la recuperación fácil del amoníaco, pero el costo del amoníaco y su recuperación pueden ser elevados (Teymouri et al., 2005; Holtzapple et al., 1991). La EV utiliza CO₂ a alta presión, liberado mediante descompresión explosiva, y se cree que el CO₂ forma ácido carbónico, mejorando la tasa de hidrólisis. Aunque el CO₂ podría ser utilizado sin ácidos fuertes, el costo de capital y operación es generalmente más alto y su eficacia es inferior a otros métodos de explosión (Jayawardhana y Van Walsum, 2004). Finalmente, el pretratamiento mecánico/alcalino combina acción mecánica con tratamiento alcalino, mejorando la accesibilidad de la celulosa al eliminar lignina y algunas hemicelulosas. Este método mejora la eficiencia del pretratamiento al aumentar la accesibilidad de la celulosa y reducir la formación de productos de degradación, pero con costos asociados al uso de productos químicos y la necesidad de reciclaje y tratamiento de desechos (Chang y Holtzapple, 2000).

- Composición química: celulosa, hemicelulosa y lignina

Celulosa: la celulosa es una cadena larga de moléculas de glucosa unidas por enlaces glucosídicos (Bagüin y Aubert, 1994) y es el principal componente de los materiales lignocelulósicos, representando aproximadamente el 45% del tejido vegetal. Es un polímero lineal compuesto por subunidades de D-glucosa unidas por enlaces glucosídicos β -1,4, formando moléculas de celobiosa. Estas moléculas se agrupan en largas cadenas llamadas fibrillas elementales, unidas por enlaces de hidrógeno y fuerzas de van der Waals. La hemicelulosa y la lignina recubren las microfibrillas, que a su vez se agrupan para formar fibras de celulosa. La celulosa puede presentarse en forma cristalina, que es menos susceptible a la degradación enzimática, o en forma amorfa, que es más vulnerable a esta degradación. La asociación de la celulosa con otras sustancias vegetales puede influir en su biodegradabilidad (Pérez et al., 2002).

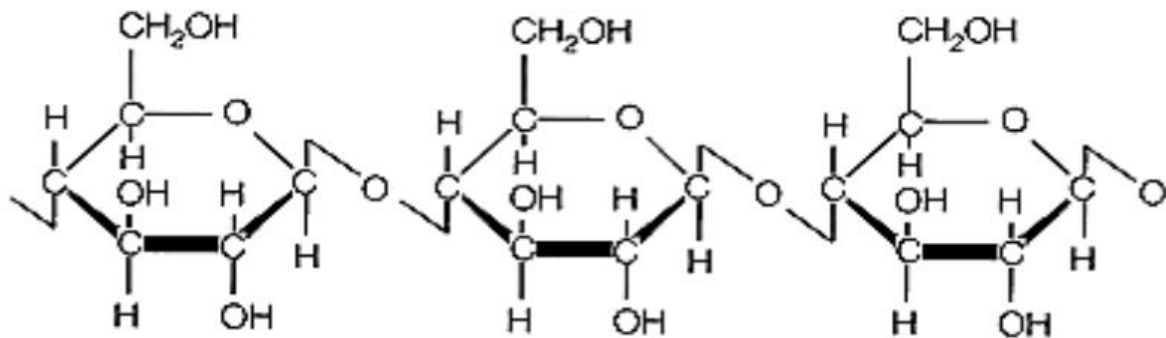


Figura 2. Estructura de la celulosa (Redwan et al., 2017).

Hemicelulosa: las hemicelulosas son una familia de polisacáridos que unen las fibras de celulosa en microfibrillas y se enlazan con la lignina, formando una red compleja que proporciona resistencia estructural. Están compuestos por varios tipos de monosacáridos como xilosa, manosa, galactosa, glucosa, arabinosa y ácidos urónicos. Estos azúcares se unen mediante enlaces glucosídicos β -1,4 y, en algunos casos, β -1,3, formando cadenas ramificadas de menor peso molecular. Las hemicelulosas actúan como una matriz que conecta las microfibrillas de celulosa, proporcionando cohesión y flexibilidad a la estructura de la pared celular. Al unirse con la lignina, forman una red tridimensional que refuerza la pared celular, otorgándole resistencia y estabilidad estructural (Pérez et al., 2002).

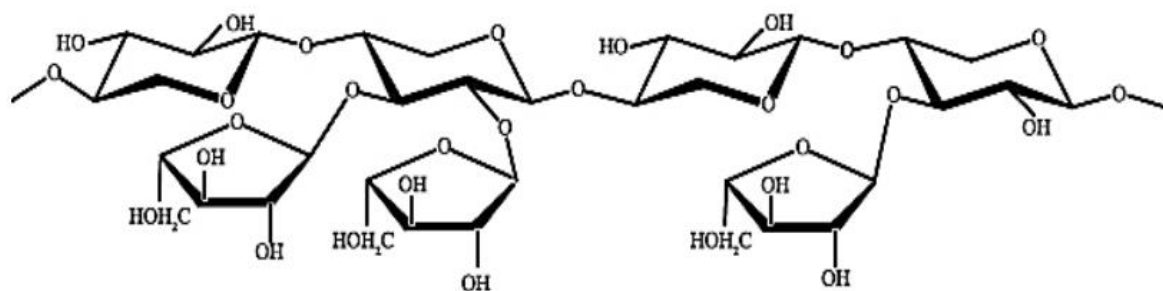


Figura 3. Estructura de la hemicelulosa (Redwan et al., 2017).

Lignina: es un polímero tridimensional de unidades de fenilpropanoides, actúa como un adhesivo que da rigidez y resistencia a la compresión a las paredes celulares de las plantas (Wang y Liu, 2010). Forma una estructura tridimensional que varía según el tipo de planta. La lignina proporciona rigidez y resistencia a la compresión a las paredes celulares de las plantas, protege contra la degradación por microorganismos y patógenos, y contribuye a la impermeabilidad celular, facilitando el transporte eficiente de agua (Beckham, 2018).

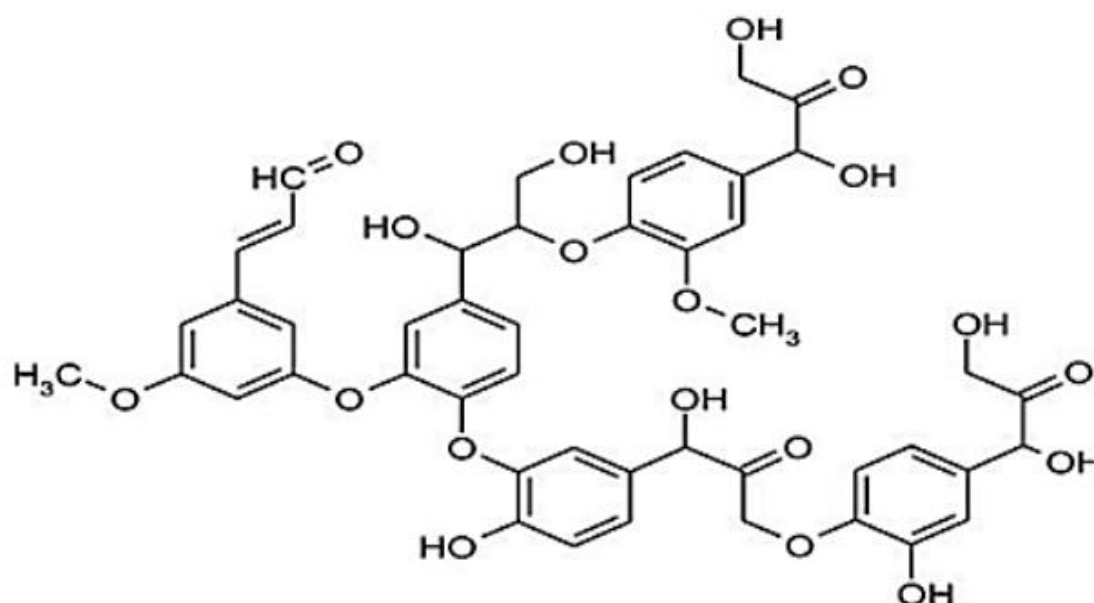


Figura 4. Estructura de la lignina (Redwan et al., 2017).

La tabla 1 resume la proporción de celulosa, hemicelulosa y lignina en hojas de banano (*Musa paradisiaca*) y hojas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), especies que serán utilizadas en este estudio.

Tabla 1. Composición de la biomasa de las hojas de banano y hojas de caña de azúcar.

Biomasa	Celulosa (% m/m)	Hemicelulosa (% m/m)	Lignina (% m/m)	Referencias	
Hojas de banano (<i>Musa paradisiaca</i>)	56 - 67	8 - 15	10 - 12	Calampa	Torres (2000),
Hojas de caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)	40 - 50	20 – 30	20 - 30	Palaniyappan,	(2016)

2.2.2 Macronutrientes presentes en la biomasa provenientes de las hojas de caña de azúcar y de banano

Las hojas contienen macronutrientes esenciales como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg). Estos macronutrientes tienen roles cruciales tanto estructurales como metabólicos en las plantas. El carbono es el principal componente estructural de las paredes celulares, mientras que el Ca y el Mg están asociados con las pectinas en las paredes celulares, contribuyendo a su rigidez y estabilidad. Los macronutrientes N, P y K están mayormente involucrados en funciones metabólicas, como la fotosíntesis y la síntesis de biomoléculas. Esta combinación de funciones estructurales y metabólicas destaca la importancia de estos macronutrientes en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Xing et al., 2021).

Las hojas tienen una notable capacidad para acumular macronutrientes debido a diversos factores biológicos y funcionales. Principalmente, las hojas son el principal sitio de fotosíntesis, un proceso que transforma la energía lumínica en energía química almacenada en compuestos como adenosín trifosfato (ATP) y Nicotiamida-Adenina Dinucleotido fosfato. Este proceso demanda grandes cantidades de N, P y K, necesarios para la síntesis de clorofila, ATP y otras moléculas importantes. Los nutrientes se almacenan en estructuras especializadas, como las vacuolas, organelos celulares rodeados por una membrana que permiten el almacenamiento eficiente y controlado de solutos sin interferir con otras funciones de la célula (Salvador et al., 1999).

Además, el transporte de nutrientes desde las raíces a las hojas a través del xilema, un tejido vascular especializado que conduce agua y minerales, garantizando que los macronutrientes se acumulen en los lugares donde son más necesarios. Una vez en las hojas, estos nutrientes

pueden redistribuirse a otros órganos según las necesidades fisiológicas de la planta. Durante períodos de deficiencia de nutrientes en el suelo, las plantas movilizan los nutrientes almacenados en las hojas hacia áreas de crecimiento activo, lo que ayuda a mantener el crecimiento y desarrollo. La capacidad de las hojas para almacenar y movilizar macronutrientes también es esencial para la adaptación y respuesta al estrés ambiental. En situaciones de estrés, como sequía o baja disponibilidad de nutrientes, las hojas actúan como reservorios que la planta utiliza para mantener funciones esenciales y asegurar su supervivencia. Esta capacidad de acumulación y redistribución de nutrientes resalta la importancia de las hojas no solo como sitios de fotosíntesis, sino también como centros de gestión y regulación de nutrientes (Salvador et al., 1999).

- Técnicas de análisis

Existen diversas técnicas para analizar el contenido de N en la biomasa lignocelulósica, que incluyen métodos tanto destructivos como no destructivos. Los métodos destructivos tradicionales, como la digestión Kjeldahl y la combustión Dumas, son precisos pero requieren mucho tiempo (Muñoz-Huerta et al., 2013). Por otro lado, las técnicas no destructivas, como los espectrorradiómetros, reflectómetros y sensores digitales, se basan en las propiedades ópticas de los tejidos foliares de las plantas para estimar el contenido de N. Aunque estas técnicas permiten una evaluación rápida, pueden presentar limitaciones como la saturación de clorofila y la interferencia atmosférica (Chowdhury et al., 2024). Además, las técnicas basadas en el campo, como la extracción de savia del xilema y la exudación de savia del floema, pueden emplearse para analizar la absorción y distribución de N en los árboles (Rennenberg et al., 1996).

El análisis del contenido de P en la biomasa lignocelulósica implica el uso de diversas técnicas analíticas. Los métodos espectroscópicos, como la espectroscopía Raman, de infrarrojo medio y de infrarrojo cercano, han demostrado ser valiosos para la detección rápida y a gran escala de materias primas (Lupoi et al., 2014). Las técnicas químicas y fisicoquímicas tradicionales, como la cromatografía, el análisis térmico y la microscopía, proporcionan información complementaria sobre la composición molecular y microestructural (Rodrigues et al., 2022). La espectroscopía moderna, ofrece una alternativa más rápida y económica a los métodos empíricos convencionales, optimizando potencialmente las operaciones de biorrefinería (Krasznai et al., 2018). Para la biomasa rica en P, se utilizan técnicas analíticas específicas para caracterizar el P en la biomasa, el carbón y las cenizas. Comprender las transformaciones del P durante la conversión térmica es crucial, ya que los altos niveles de P pueden causar problemas operativos (Lidman et al., 2023).

Se han evaluado diversas técnicas para medir el contenido de K en el suelo y en los materiales vegetales. La espectroscopía de infrarrojo cercano se ha destacado como una técnica no invasiva para estimar los niveles de K en el suelo (Endut et al., 2023). En el caso de los materiales vegetales, se ha encontrado que los métodos de extracción con ácido clorhídrico (HCl) son equivalentes al método triácido estándar, que utiliza una mezcla de ácidos nítrico, sulfúrico y perclórico para descomponer la muestra y liberar nutrientes esenciales al romper enlaces en compuestos orgánicos y minerales complejos, mientras que la extracción con acetato de amonio puede sobreestimar ligeramente las concentraciones de potasio (Rao et al., 1998).

- Importancia de N, K y P en el contexto agrícola (fertilizantes)

El objetivo principal de la aplicación de fertilizantes al suelo es mejorar su estado nutricional y calidad al enriquecerlo con los nutrientes que le faltan. Las plantas de cultivo necesitan N, P y K para mantener funciones fisiológicas normales, estos corresponden a los macronutrientes primarios, que las plantas necesitan en grandes cantidades en comparación con otros nutrientes (INEN, 1998). La deficiencia de N puede llevar a un crecimiento deficiente y lento, mientras que un exceso de este nutriente puede resultar en maduración tardía y una calidad inferior de las hojas (Mani, 2002). Los fertilizantes contienen todos los elementos necesarios para el crecimiento de las plantas y se aplican al suelo para mejorar sus propiedades físicas, biológicas y químicas. Las propiedades físicas incluyen, la porosidad y la capacidad de absorción del suelo. Las propiedades biológicas están relacionadas con los microorganismos presentes en el suelo, y las propiedades químicas con el pH del suelo y la disponibilidad de nutrientes. Se ha demostrado que tanto los fertilizantes orgánicos como los inorgánicos aumentan el rendimiento y mantienen la productividad del suelo (Chukwu et al., 2012). Por lo tanto, los fertilizantes son necesarios para reponer los nutrientes que se han extraído del suelo durante la cosecha y para complementar los nutrientes existentes con el fin de mejorar el rendimiento de los cultivos (Olatunji y Ayuba, 2012).

Un fertilizante de origen orgánico es un producto derivado de la descomposición de materiales vegetales y/o animales, que además de contener materia orgánica, incluye nutrientes esenciales en concentraciones que superan los niveles mínimos necesarios. Estos fertilizantes suelen ser de liberación lenta, contribuyendo a la actividad microbiológica del suelo, y mejoran sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Para ser clasificado como orgánico, un fertilizante debe contener carbono orgánico, nutrientes esenciales y/o secundarios provenientes de fuentes naturales (AEFA, 2019).

Tabla 2. Límites mínimos requeridos de concentración de macronutrientes en fertilizantes orgánicos (Agrocalidad, 2022).

Macronutrientes	Mínimo declarable (%)
N total	3
P (como P₂O₅)	3
K (como K₂O)	3
Ca (como CaO)	1
Mg (como MgO)	1

2.3 Proceso de explosión con vapor

2.3.1 Principios de la explosión con vapor en materiales lignocelulósicos

La explosión por vapor es un tratamiento termo-mecano químico que facilita la descomposición de los componentes estructurales lignocelulósicos mediante el calentamiento, la formación de ácidos orgánicos durante el proceso y fuerzas de corte que generan la expansión de la humedad. (Jacquet et al., 2015). Se libera ácido acético de los materiales lignocelulósicos, lo que provoca la hidrólisis parcial de los componentes de la pared celular, un proceso conocido como autohidrólisis. Durante el pretratamiento, el vapor saturado a alta presión penetra en la resistente pared celular por difusión, y la separación mecánica de las fibras se logra mediante la rápida evaporación de la humedad condensada al liberar presión. Esto genera una fuerza de corte que actúa sobre la estructura circundante, resultando en la descomposición mecánica de la biomasa lignocelulósica. (Chornet, 1991)

Los grupos acetilo y uronilo están vinculados a la estructura de los componentes hemicelulósicos. A medida que el vapor condensado penetra en la biomasa, se producen reacciones de ramificación que liberan ácidos acético y urónico, los cuales catalizan la hidrólisis de las hemicelulosas en oligosacáridos y monosacáridos. En condiciones severas, la celulosa amorfa podría ser parcialmente despolimerizada. Además, pueden generarse productos de degradación adicionales (furfural a partir de xilosa y 5-hidroximetil furfural a partir de glucosa), que inhiben el crecimiento microbiano y, por lo tanto, la eficiencia de la fermentación (Wang et al., 2015).

La biomasa lignocelulósica, que se caracteriza por su estructura molecular rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, es altamente resistente a la descomposición. Sin embargo, puede ser degradada mediante diversos tratamientos químicos, físicos y/o biológicos. La elección del

método de EV para la extracción de fibras se fundamenta en sus ventajas significativas, como su alta eficiencia energética, que se traduce en un menor consumo de energía en comparación con otros métodos, la ausencia de uso de productos químicos peligrosos, su reducido impacto ambiental, se puede aplicar a todo tipo de biomasa. Además, su amplia aplicabilidad a diversas formas de biomasa vegetal y la facilidad para ajustar las condiciones de pretratamiento lo hacen un proceso versátil y adaptable a diferentes contextos (Wang y Liu, 2010).

Aunque los procesos de EV han sido identificados como procesos físicos, estos en realidad son procesos fisicoquímicos ya que en el pretratamiento se identifican dos fenómenos: I) Acción mecánica provocada por la rápida liberación de presión; II) acción química que resulta de la autohidrólisis, ocasionado por el ácido acético formado durante el tratamiento con vapor (Kokta, 1998). La EV desfibrila las fibras y despolimeriza la celulosa y lo que las hace más susceptibles a las enzimas hidrolíticas, lo que resulta en fibras divididas en fragmentos individuales (Imagen 6), esto significa una ventaja ya que mejora su digestión y permita su posterior separación y en consecuencia utilizarlas en diversas aplicaciones (Samaranayake, 1994). La descompresión fuerte se realiza cuando finaliza el tiempo de residencia, ya que la expansión mecánica ayuda a separar la matriz lignina-celulosa. Esto facilita el uso de celulosa en aplicaciones posteriores, como la producción de biocombustibles, productos químicos o materiales sostenibles. Estos resultados han impulsado el desarrollo a escala piloto e industrial del proceso para diversas aplicaciones, tales como la obtención de etanol y moléculas de plataforma mediante fermentación, densificación energética y producción de pellets negros, así como la fabricación de fibras (Ziegler-Devin et al., 2021).

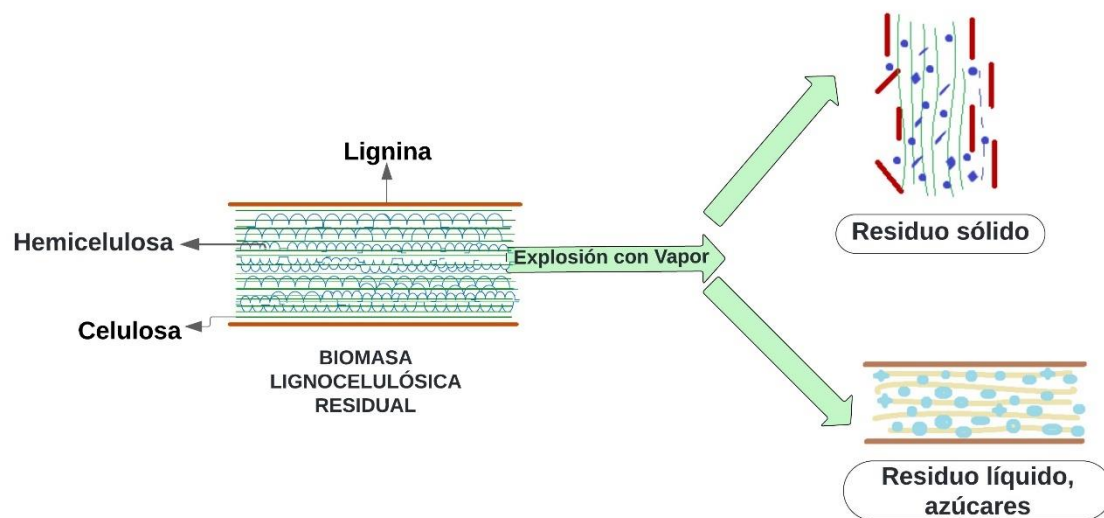


Figura 5. Proceso de pretratamiento de la biomasa lignocelulósica mediante explosión con vapor y sus efectos en la composición de la biomasa

- Mecanismo del proceso

La explosión por vapor puede realizarse en modo discontinuo o continuo. En el sistema discontinuo, generalmente se utiliza una caldera para generar vapor, un sistema automático que controla la presión y el tiempo de reacción, un reactor donde se cargan las muestras para su tratamiento con vapor a alta temperatura y presión, y una "cámara de descarga" para liberar la biomasa saturada de vapor tras el proceso de descompresión. Este tipo de sistema es especialmente adecuado para operaciones en laboratorio, ya que permite un control más preciso sobre las condiciones de tratamiento, así como la selección de la biomasa y los reactivos (De Corato et al., 2011)

En contraste, los sistemas continuos son más complejos y requieren una configuración más elaborada. En este tipo de procesos, la biomasa se transfiere automáticamente desde un contenedor de almacenamiento a un digestor mediante dispositivos de alimentación, y se transporta a través del digestor utilizando un tornillo sin fin, mientras se introduce vapor a través de boquillas. Un sistema de control ajusta la adición y liberación de vapor según las condiciones de reacción establecidas previamente. Este enfoque es más adecuado para procesos a gran escala, ya que permite operar a mayores capacidades y logra un tratamiento más efectivo y eficiente en el uso de energía. (Chen et al., 2013)

En el presente estudio, se optó por un sistema discontinuo, lo que permitió una mejor adaptación de las condiciones de tratamiento y un análisis detallado de los efectos de la explosión por vapor en las muestras de biomasa utilizadas.

Este tratamiento se lleva a cabo en dos fases principales:

Etapas de ebullición con vapor: Las temperaturas varían entre 170° y 210°C, lo que induce la descomposición hidrolítica de la matriz lignocelulósica (Auxenfans et al., 2017).

Fase de explosión: la rápida disminución de presión que se produce en esta fase provoca la expansión del vapor dentro de las fibras, alterando su estructura. Este fenómeno convierte la energía térmica en energía mecánica, facilitando la desfibrilación de las fibras y la despolimerización parcial de la celulosa, lo que las hace más susceptibles a las enzimas hidrolíticas. (Samaranayake, 1994; Auxenfans et al., 2017).

- Factores que influyen en el proceso

Los principales factores que afectan el pretratamiento por EV son el tamaño de las partículas, la temperatura, la humedad y el tiempo de residencia (Gonçalves et al., 2011). Además, la composición de la biomasa también influye en la eficacia del pretratamiento. Por ejemplo, las maderas blandas son especialmente resistentes al EV debido a que sus hemicelulosas tienen un menor contenido de grupos acetilo, que son necesarios para catalizar la autohidrólisis de la biomasa (Alvira et al., 2010).

Tamaño de partículas: Las partículas de biomasa más pequeñas permiten una transferencia de calor más eficiente y rápida dentro del reactor. En cambio, las astillas muy grandes pueden causar una sobrecocción en la superficie, formar productos de degradación y resultar en una hidrólisis incompleta en el interior (Brownell et al., 1986). Sin embargo, si el material está molido demasiado fino (como el aserrín), es difícil de procesar en reactores discontinuos debido a su baja densidad. Para asegurar la eficiencia y la uniformidad del pretratamiento, se necesita un equipo que maneje el flujo tapón (Ramos, 2003). Además, Ballesteros et al. (2011) descubrieron que las astillas más grandes (de 8 a 12 mm) eran las más efectivas para lograr altas recuperaciones de celulosa y hemicelulosa, así como una buena digestibilidad enzimática durante el pretratamiento EV de maderas blandas.

Humedad: Cuando el contenido de humedad es demasiado alto, los poros de la biomasa se llenan de agua, lo que retrasa el calentamiento hasta alcanzar la temperatura de operación y el inicio de la autohidrólisis (Wright, 1988). Ballesteros et al. 2011 no encontraron diferencias importantes entre la paja de trigo tratada con vapor a un 6% o un 30% de humedad; sin

embargo, la biomasa con mayor humedad mostró un rendimiento ligeramente mejor en términos de eficiencia de hidrólisis.

Temperatura y Tiempo de residencia: Tanto la temperatura como el tiempo de residencia son cruciales en el proceso de EV. Aunque la temperatura no afecta significativamente la cantidad total de glucosa libre recuperada después del EV en álamo a 200 y 220 °C, sí influye mucho en la recuperación de xilosa y en el rendimiento de HE de celulosa (Martín-Davison et al., 2015). A mayor temperatura, se recupera menos xilosa tanto en la fracción sólida como en el pre hidrolizado, lo que indica una mayor solubilización de hemicelulosa y una mayor degradación de xilosa libre a 220 °C. También se observa que el rendimiento de HE de celulosa aumenta con la temperatura. En general, temperaturas altas tienden a reducir el rendimiento total de carbohidratos (Ruiz et al., 2008) debido a la degradación de azúcares, mientras que tiempos de residencia largos aumentan la formación de lignina y la deshidratación de pentosano (Ramos, 2003). Elegir entre operar a altas temperaturas y tiempos de residencia cortos o a bajas temperaturas y tiempos largos puede ser complicado, y la decisión debe basarse en el tipo de materia prima y la finalidad de pretratamiento.

- Productos sólidos y líquidos generados en el Proceso. Posibles usos.

Productos sólidos: la fracción sólida obtenida después del tratamiento consiste en un material pretratado conocido como *slurry*. Esta fracción sólida contiene principalmente celulosa, hemicelulosa y lignina que no se han disuelto durante el proceso. El pretratamiento con EV induce cambios químicos en la biomasa, como la redistribución y eliminación parcial de la lignina y la solubilización de la hemicelulosa. Estos cambios incrementan la porosidad de la biomasa tratada, mejorando así la accesibilidad de las enzimas a las fibras de celulosa y, en consecuencia, aumentando la digestibilidad del sustrato pretratado. La fracción sólida puede someterse a HE para producir azúcares fermentables. Los azúcares obtenidos pueden ser utilizados posteriormente para la producción de bioetanol, mientras que los residuos pueden ser convertidos en otros bioproductos o biocombustibles. Además, la fracción sólida puede someterse a operaciones de acondicionamiento para mejorar su digestibilidad y facilitar su conversión posterior (Ramos, 2003; Ruiz et al., 2008).

Productos líquidos: la fracción líquida conocida como "pre hidrolizado", contiene los azúcares solubilizados, principalmente aquellos provenientes de la hemicelulosa, así como casi todos los productos de degradación generados durante el pretratamiento. Estos azúcares solubilizados resultan de la autohidrólisis iniciada por los ácidos orgánicos liberados de los grupos acetilo de la hemicelulosa durante el tratamiento con vapor. Esta fracción contiene azúcares solubilizados, principalmente azúcares hemicelulósicos, además de otros

compuestos generados durante el pretratamiento, como ácidos orgánicos, fenoles, furfural, HMF y sólidos solubles. Estos componentes pueden ser utilizados para la producción de bioproductos o bioetanol, aprovechando el contenido de azúcares y otros compuestos químicos de interés industrial (Ballesteros et al., 2011; Wright, 1988).

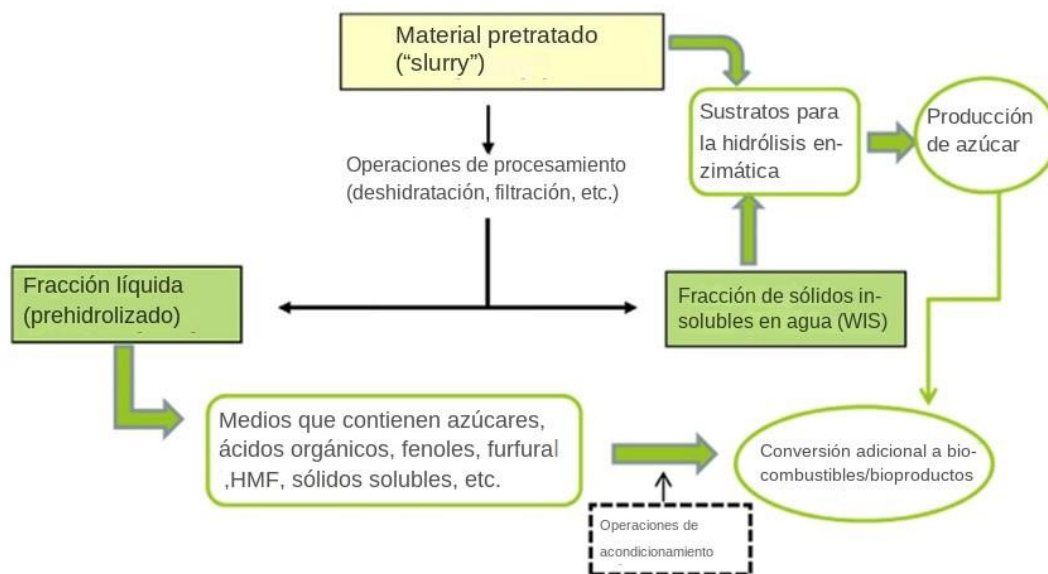


Figura 6. División del material pretratado y posibles operaciones de procesamiento (Duque et al., 2016).

2.4 Fibras obtenidas por el proceso de explosión de vapor. Compuestos Polímero-Fibra.

2.4.1 Definición y tipos de fibras naturales

Las fibras naturales también conocidas como fibras vegetales o fibras lignocelulósicas, se caracterizan porque sus componentes principales son la lignina, la celulosa y la hemicelulosa lo que le confiere una importante resistencia a la tracción, esta propiedad se debe a que las fibras vegetales individuales son compuestos naturales complejos que constan de múltiples células, cada una de las cuales está compuesta por microfibrillas de celulosa entrelazadas con lignina y hemicelulosa. Las proporciones relativas de celulosa y lignina/hemicelulosa, así como el ángulo de hélice de las microfibrillas, varían dependiendo de la fibra lignocelulósica. Estos parámetros estructurales determinan las propiedades mecánicas de cada fibra, otorgando a cada una características únicas y específicas.

En el caso del cultivo de banano, la literatura muestra que es posible extraer la fibra de plátano en una forma ecológica y biodegradable en contraste con otras fibras sintéticas disponibles. La fibra se puede obtener de la planta entera del banano. Esta fibra de alta calidad es conocida por sus excepcionales propiedades mecánicas, que se atribuyen a su alto contenido en celulosa y a su bajo contenido en lignina (Vadivel, 2017).

El uso de fibras naturales representa beneficios ambientales, económicos y sociales por lo que posee una variedad de aplicaciones como materiales compuestos, textiles, papel, cartón, materiales biodegradables, bioplásticos (FAO, 2009).

2.4.2 Biodegradabilidad de las fibras tratadas

- Factores que afectan la biodegradabilidad

La biodegradabilidad de las sustancias está determinada por varios factores esenciales. Las condiciones aeróbicas y anaeróbicas, junto con la disponibilidad de co-metabolitos y la preexposición microbiana, tienen un impacto significativo en las tasas de biodegradación (Fernandes et al., 2020). En el caso de los polihidroxicanoatos (PHA), la composición de la comunidad microbiana, así como la temperatura, el pH y la humedad del suelo, son factores determinantes clave. Además, el origen del inóculo es crucial en las pruebas de biodegradabilidad anaeróbica, ya que afecta la cantidad, la actividad y las especies de microorganismos presentes (Andrade y Buitrón, 2002). La biodegradación de los bioplásticos depende del tipo de almidón utilizado; los bioplásticos a base de yuca son más rápidos en degradarse que los a base de maíz. Esta biodegradabilidad puede mejorarse con aditivos naturales como la cola cordifolia. Además, los factores ambientales, como la humedad y la temperatura, juegan un papel importante. La biodegradación puede aumentar hasta un 15% con la humedad. Sin embargo, un enriquecimiento microbiano excesivo y temperaturas superiores a 30 °C pueden dificultar el proceso de biodegradabilidad (Zounggran et al., 2020). Para evaluar adecuadamente el impacto ambiental de los materiales biodegradables y optimizar sus aplicaciones, es esencial comprender estos factores.

Métodos de evaluación de la biodegradabilidad

Para evaluar la biodegradabilidad de estos materiales en el contexto agrícola, es crucial referirse a métodos estandarizados que permitan medir de manera precisa la descomposición de las fibras en condiciones controladas. El "Método de Ensayo para Determinar la Biodegradación Aeróbica en el Suelo de los Materiales Plásticos, NTE INEN 2642:2012" es un método reconocido que, aunque originalmente diseñado para materiales plásticos, también se puede utilizar para evaluar la descomposición de fibras naturales en contacto con el suelo. Para determinar la biodegradabilidad aeróbica, se selecciona un material plástico o compost con restos de material plástico después del compostaje. El suelo se utiliza como fuente de inóculo y como matriz, exponiendo plástico o compost al suelo y midiendo el dióxido de carbono (CO₂) producido por los microorganismos a lo largo del tiempo. El grado de biodegradabilidad se evalúa mediante la comparación de la producción de CO₂ con el

contenido en carbono, medido o calculado, y expresado en fracciones de tiempo. La Norma Técnica Ecuatoriana (NTE) INEN 2642:2012 se estableció en el país.

Se han implementado diversas metodologías para evaluar la biodegradabilidad de bioplásticos y biocompuestos en distintos entornos. Estas metodologías incluyen la medición de gases como CO_2 y CH_4 , la determinación de la pérdida de masa, el uso de espectroscopia, análisis visual y microscopía electrónica de barrido (Ruggero et al., 2019). Existen pruebas estandarizadas para evaluar la biodegradabilidad en suelo, compost y sistemas acuáticos; sin embargo, aún existen vacíos en las normas actuales que deben ser abordados para obtener datos consistentes y desarrollar sistemas de etiquetado uniformes (Pires et al., 2022). Las tasas de biodegradación de estos materiales pueden variar considerablemente según su composición y las condiciones ambientales, especialmente en lo que respecta a las propiedades del suelo y la actividad microbiana. Aunque algunos métodos como el análisis visual y la medición de la pérdida de masa no proporcionan una prueba científica concluyente de la biodegradación, pueden servir como indicadores útiles, particularmente en experimentos de campo abiertos (Francioni et al., 2022). Para asegurar la comparabilidad entre estudios, es crucial desarrollar una metodología común que considere todos los factores relevantes que influyen en la biodegradación, tales como las variaciones en la actividad microbiana y las propiedades específicas del suelo (Vázquez-Rodríguez y Beltrán-Hernández, 2004). Además, la integración de técnicas avanzadas como la espectroscopia y la microscopía electrónica puede ofrecer una mayor comprensión del proceso de biodegradación a nivel molecular y estructural.

La evaluación de la biodegradabilidad de fibras obtenidas a partir de residuos agrícolas es un aspecto esencial en el camino hacia una economía circular y sostenible. Evaluar la biodegradabilidad de las fibras naturales es crucial antes de su transformación en nuevos productos. La biodegradación está influenciada por la estructura fisicoquímica de las fibras, las condiciones ambientales y las poblaciones microbianas (Rajeshkumar et al., 2023). Los métodos de prueba estandarizados para condiciones aeróbicas y anaeróbicas son esenciales para evaluar el comportamiento al final de la vida útil de estos materiales (Rajeshkumar et al., 2023). Comprender la biodegradabilidad es fundamental para desarrollar materiales sostenibles y abordar la creciente preocupación por la gestión de los residuos agrícolas (Yamunadevi y Divya, 2023). En línea con el enfoque de la bioeconomía circular, Jayaprakash (2022) subraya la importancia de reutilizar los residuos agrícolas para producir fibras naturales, las cuales pueden utilizarse en la creación de materiales compuestos biodegradables.

Además de la biodegradabilidad microbiana importante también evaluar la degradación física a través del porcentaje de pérdida de peso. Estos dos enfoques proporcionan una comprensión más completa de cómo se descomponen las fibras en diversos ambientes, como el suelo o en condiciones controladas de laboratorio. La biodegradabilidad microbiana se mide mediante curvas que registran la evolución de la descomposición a lo largo del tiempo, generalmente a través de la producción de CO_2 o la reducción de la masa orgánica (Shah et al., 2008). Estas curvas permiten cuantificar la actividad microbiana en relación con la disponibilidad de compuestos como la celulosa y la lignina en las fibras. La velocidad de biodegradación varía dependiendo de factores como la composición química de las fibras, la presencia de lignina, y las condiciones ambientales (humedad, temperatura, pH) (Pinchao-Pinchao et al., 2019). El análisis de la pérdida de peso nos permite entender la degradación física de los materiales, que complementa las mediciones de biodegradabilidad. Este enfoque cuantifica directamente la reducción en la masa de las fibras o materiales compuestos después de su exposición a condiciones degradativas, como el enterramiento en suelo. (Torres et al., 2006). Además, el porcentaje de pérdida de peso permite la comparación directa entre diferentes tipos de fibras y tratamientos aplicados. Por ejemplo, fibras tratadas químicamente con agentes de refuerzo o recubrimientos protectores tienden a mostrar una menor pérdida de peso, lo que indica una mayor resistencia a la biodegradación. Estudios han demostrado que el tratamiento con agentes hidrofóbicos puede reducir significativamente la pérdida de peso de las fibras naturales, lo que prolonga su vida útil en aplicaciones agrícolas y de construcción (Kumar et al., 2010). Tanto las curvas de biodegradabilidad como las mediciones de pérdida de peso ofrecen una visión detallada del comportamiento de las fibras y los materiales naturales durante su degradación. Al integrar estas técnicas, es posible ajustar el diseño de los materiales para satisfacer necesidades específicas, como en el caso de aplicaciones que requieren una biodegradabilidad rápida o una mayor durabilidad. En el sector agrícola, el uso de fibras derivadas de residuos agrícolas ofrece múltiples beneficios. Además de gestionar de manera más sostenible los desechos, ayuda a cerrar el ciclo de vida de los productos fabricados a partir de estas fibras, al integrarse como materia prima en la fabricación de colchones plásticos biodegradables (Bhardwaj et al., 2020). Este concepto es especialmente relevante en la agricultura, donde el uso de películas de acolchado plástico (*mulching*) es común; sin embargo, pero estos materiales generan serios problemas ambientales debido a que no se degradan naturalmente y persisten en el medio ambiente, por lo que se genera la necesidad de explorar otras opciones. A través de la transformación de la biomasa residual, es posible desarrollar materiales biodegradables que pueden ser reintegrados en el mismo sector agrícola, en aplicaciones como mallas o acolchados antihierbas biodegradables, así como mantas ecológicas para jardín con semillas de césped,

promoviendo una economía circular que reduce la dependencia de productos no renovables (Menossi et al., 2021). Esta alternativa ecológica minimiza el impacto ambiental de los residuos agrícolas, cerrando el ciclo de los recursos en el mismo sector donde se generan.

El mulching es una técnica agrícola que consiste en la colocación de una capa de material orgánico o inorgánico sobre la superficie del suelo alrededor del cultivo deseado. Este material, conocido como mantillo, tiene la capacidad de modificar el entorno de crecimiento de las plantas y mejorar la productividad del cultivo. Las mantas de mulching se utilizan ampliamente en la agricultura, horticultura y floricultura, ofreciendo beneficios significativos tales como la inhibición de malezas, la retención de la hidratación del suelo, el control de la temperatura, y la estabilización del suelo. Además, contribuyen a la reducción de la lixiviación de nutrientes, mejoran la materia orgánica del suelo, y promueven la germinación y el crecimiento de las plantas (Manna, 2018; Restrepo-Osorio, 2019).

El uso de mantas de acolchado en la agricultura es una técnica esencial que puede reducir la cantidad de trabajo en la jardinería, facilitando la producción de plantas y árboles orgánicos. El acolchado (*mulch*) se refiere a cualquier material aplicado a la superficie del suelo como cobertura, y se puede dividir en dos grupos generales: orgánicos e inorgánicos (Jeyanthi, 2019). La selección del material de cobertura adecuado depende del tipo de cultivo, las prácticas de manejo del cultivo, y las condiciones climáticas (Kader, 2017).

El mulching orgánico se refiere a la cobertura del suelo con materiales naturales como residuos de cultivos, paja, corteza de árboles, aserrín, entre otros. Estos materiales, al descomponerse, no solo ayudan a conservar la humedad del suelo, sino que también mejoran sus propiedades físicas, químicas y biológicas al agregar materia orgánica. Además, este tipo de mulching reduce la erosión del suelo y minimiza la pérdida de nutrientes por escorrentía y lixiviación (Bot y Benites, 2005; Chakraborty et al., 2008). En climas cálidos, el uso de mulching orgánico ha demostrado ser superior al mulching de polietileno (PE), mejorando la temperatura y humedad del suelo, lo que resulta en un incremento del rendimiento de los cultivos (Ghosh et al., 2006).

Por otro lado, el mulching inorgánico, como el plástico, es ampliamente utilizado debido a sus beneficios en el incremento de la temperatura del suelo, el control de malezas, y la conservación de la humedad. Sin embargo, este tipo de mulching no se descompone y puede tener un impacto negativo en el medio ambiente debido a su persistencia a largo plazo (Espí et al., 2006). A pesar de sus ventajas en la producción de cultivos, la acumulación de desechos plásticos es un problema creciente, lo que ha llevado a la investigación y desarrollo

de plásticos fotodegradables o biodegradables como alternativas más sostenibles (Sorkin, 2006).

Los colchones plásticos o películas plásticas de mantillo son ampliamente utilizados en la producción agrícola, consistiendo en películas de polietileno lineal y de baja densidad colocadas directamente sobre la superficie del suelo alrededor de las plantas (Brodhagen et al., 2015). La idea del uso del PE como mantillo se puede atribuir al Dr. Emery M. Emmert, quien comprendió las propiedades de este polímero en la década de 1950. Estas películas ofrecen beneficios como el control de malezas e insectos, la conservación de la humedad del suelo, la protección de las plantas contra varios agentes, la reducción de la erosión del suelo, y el control de la temperatura del suelo (Hossain et al., 2011).

Sin embargo, el principal problema asociado con el uso de películas plásticas no biodegradables es que pueden contaminar el suelo cuando se entierran en vertederos. Además, la remoción y disposición de estos residuos plásticos del campo antes o después de la cosecha es costosa y requiere mucho tiempo (Shogren, 2005). Por estas razones, los agricultores generalmente incorporan películas usadas al suelo o las queman, lo que causa contaminación dañina (Briassolious, 2015). Ante estos desafíos, surgió la necesidad de desarrollar alternativas más sostenibles, como los mantillos plásticos biodegradables, que se introdujeron en la década de 1980. Las fibras naturales tienen buenas propiedades mecánicas y son biodegradables, lo que las hace muy adecuadas para su uso en películas en combinación con polímeros biodegradables. Algunas fibras naturales como el ramio, el lino, el cáñamo, el algodón, y otros polímeros biodegradables como el almidón, el alcohol polivinílico, el tereftalato de adipato de polibutileno, el poli(succinato-co-adipato de butileno) y el poli(ácido láctico) se han utilizado para preparar películas agrícolas biodegradables (Restrepo-Osorio, 2019).

El uso de plásticos biodegradables en la agricultura no solo contribuye a reducir la contaminación por plásticos, sino que también mantiene los beneficios del mulching plástico tradicional, como la conservación de la humedad, el control de malezas, y la mejora de la calidad del suelo. Al final de la temporada de cultivo, estos materiales pueden integrarse directamente en el suelo, eliminando la necesidad de retirar y desechar el plástico, lo que ahorra tiempo y costos (Malinconico et al., 2008).

El mulching plástico biodegradable es una alternativa innovadora al mulching plástico convencional, diseñado para abordar los problemas ambientales asociados con la acumulación de desechos plásticos en la agricultura. Estos materiales biodegradables, compuestos de polímeros biodegradables, se descomponen completamente en el suelo

gracias a la acción de la humedad y los microorganismos, transformándose en CO₂, agua y biomasa (Kapanen et al., 2008). A pesar de sus beneficios, el precio de obtención de los colchones plásticos biodegradables es superior en más del doble al de los plásticos de PE. Además, la comunidad científica y los agricultores expresan inquietud sobre la completa degradación de estos materiales en el suelo y sus posibles efectos negativos en los ecosistemas (Hayes, 2019).

Las esteras de mantillo hechas de fibras naturales, como yute, lino, cáñamo y coco, son otra alternativa sostenible al mulching plástico. Estos materiales son biodegradables y, durante su proceso de degradación, proporcionan nutrientes al suelo, contribuyendo al crecimiento y la supervivencia de las plantas (Restrepo-Osorio, 2019).

Las fibras de banano, por ejemplo, han ganado atención como una alternativa sostenible a las fibras sintéticas en compuestos de polímeros debido a su alta resistencia, bajo costo, y biodegradabilidad (Jagadeesh et al., 2015; Adeniyi et al., 2019). Estas fibras, a menudo considerados desechos del cultivo de banano, se pueden utilizar como refuerzo en plásticos, ofreciendo un módulo y una ligereza mejorados en comparación con los materiales convencionales (Adeniyi et al., 2019). Los compuestos de fibra de banano se han estudiado ampliamente y los investigadores han comparado sus propiedades mecánicas con otros compuestos de fibra natural como el yute. Además, las hojas y los tallos de banano han demostrado potencial como bio geotextiles para el control de la erosión, con altas concentraciones de macronutrientes, particularmente K y Ca, lo que sugiere que los materiales a base de banano podrían aportar nutrientes al suelo al descomponerse sin correr el riesgo de contaminación por metales pesados (Egbujuo et al., 2018).

Las investigaciones sobre geotextiles de fibra de caña de azúcar para el control de la erosión del suelo han mostrado resultados prometedores. Las pruebas de campo han demostrado que las esteras de caña de azúcar permiten la germinación de semillas de pasto y mantienen la integridad durante fuertes lluvias, con un rendimiento comparable al de los geotextiles comerciales de madera, paja y fibra de coco (Thames, 1997; Collier et al., 1997). El bagazo de caña de azúcar, un material fácilmente disponible, se ha utilizado para producir esteras de control de la erosión a través de un proceso de fabricación continuo simple. Aunque estas esteras de bagazo tienen una menor resistencia a la tracción debido a la ausencia de red, ofrecen ventajas ambientales y potencial competitivo en los mercados local. Se han explorado varios tratamientos químicos y mecánicos para optimizar las propiedades de la fibra de bagazo para la formación de esteras (Dinu, 2006).

Las esteras de mantillo de fibra natural se pueden producir a través de varios procesos de fabricación. Un enfoque implica el cardado, el punzonado con agujas y el hidroeñredo de fibras de cáñamo y lino para crear telas biodegradables (Miao et al., 2013). Otras técnicas para compuestos de fibra natural incluyen el laminado manual, el bobinado de filamentos, la pultrusión, el moldeo por transferencia de resina, el moldeo con bolsas de vacío, el moldeo por compresión, el moldeo por inyección y la extrusión (Sapuan, 2014). También se han explorado procesos de láminas unidireccionales para aprovechar mejor la resistencia de las fibras naturales. Estos métodos de fabricación tienen como objetivo crear alternativas ecológicas a los materiales convencionales, ofreciendo beneficios como propiedades ligeras, alta resistencia específica, y biodegradabilidad (Billah et al., 2021). La elección del proceso de producción depende de la aplicación deseada y las propiedades mecánicas requeridas. La investigación en curso se centra en el desarrollo de compuestos totalmente de base biológica y métodos de fabricación eficientes, adecuados para la producción a gran escala (Ouali et al., 2017).

2.4.3 Incorporación de fibras lignocelulósicas en compuestos poliméricos

- Compatibilidad de fibras con materiales poliméricos.

Las fibras lignocelulósicas se utilizan cada vez más como refuerzo en compuestos poliméricos debido a su bajo coste, renovabilidad y biodegradabilidad. Estas fibras, compuestas de celulosa, hemicelulosa y lignina, ofrecen buena resistencia y rigidez a los compuestos (Güven et al., 2016). La adición de fibras celulósicas naturales influye positivamente en las características físico-mecánicas y térmicas de las matrices poliméricas (Thakur et al., 2013). Estos biocomposites ofrecen beneficios ambientales y características comparables a los compuestos de fibras sintéticas, aunque la absorción de humedad puede afectar sus propiedades físicas y mecánicas (Redwan et al., 2017). Las fibras lignocelulósicas son renovables, rentables y ampliamente disponibles, lo que las hace ideales para el refuerzo de polímeros. La producción de estos biocomposites ha aumentado significativamente y se proyecta un mayor crecimiento, lo que resalta su potencial en diversas aplicaciones como la industria automotriz, aeroespacial y de la construcción (Gurupranes et al., 2023).

La extrusión es el principal proceso industrial para incorporar fibras lignocelulósicas a polímeros, siendo el perfil del tornillo, la velocidad y la temperatura parámetros críticos (Gallos et al., 2017). Los estudios han demostrado que los compuestos reforzados con fibras naturales exhiben una biodegradación parcial, que varía del 5 al 15% dependiendo del contenido de fibra. La naturaleza hidrófila de las fibras naturales mejora la biodegradabilidad

de los biocompuestos en comparación con los polímeros puros (Rodríguez et al., 2022). Se han utilizado pruebas de enterramiento en el suelo para evaluar las propiedades de biodegradación de fibras naturales como el yute y biopolímeros como el ácido poliláctico, evaluando la pérdida de masa, las propiedades mecánicas y los cambios morfológicos. Las fibras naturales, derivadas de fuentes vegetales, animales y minerales, ofrecen aplicaciones potenciales en industrias como la construcción, el embalaje, la aeroespacial y la automoción (Hiremath et al, 2020). Si bien no son totalmente biodegradables, los compuestos reforzados con fibras naturales pueden contribuir a la reducción de desechos al disminuir la cantidad de contenido polimérico no biodegradable (Chattopadhyay et al., 2011).

Muchos investigadores han evaluado fibras en función de su rendimiento mecánico, relacionándolo con su morfología, composición y absorción de agua. Se han desarrollado diversas estrategias para reducir la obstrucción y absorción de humedad de estos materiales, generalmente modificando la rugosidad de la superficie, el contenido de polisacáridos o los grupos químicos. Por lo tanto, es esencial conocer sus propiedades fisicoquímicas y su comportamiento mecánico para determinar la mejor manera de utilizarlos como refuerzo (Mahdi et al., 2021). Además, como punto clave se reduce el impacto ambiental generado debido a que ya no se utilizan compuestos derivados del petróleo para la elaboración de los polímeros. Numerosos estudios recientes se han centrado en el uso de fibras naturales como refuerzos en materiales poliméricos, mostrando resultados prometedores. Por ejemplo, se ha explorado el uso de compuestos plásticos basados en gluten de trigo reforzado con fibras de cáñamo, como una alternativa sostenible a los plásticos petroquímicos. Estos estudios han encontrado una respuesta favorable tanto de los agricultores comprometidos con la producción sostenible como de los consumidores que prefieren materiales más ecológicos. Además, se ha demostrado que estos compuestos pueden biodegradar una parte significativa de su contenido de gluten de trigo en 90 días, lo que refuerza su viabilidad como opción sostenible (Muneer, 2013). En otra investigación, se desarrolló un poliuretano acuoso utilizando diisocianato de difenilmetano-50, el cual mostró mejoras en la resistencia a la tracción, resistencia al agua, estabilidad térmica e hidrofobicidad en comparación con el poliuretano de diisocianato de isoforona (Xiao et al., 2018). Por otro lado, en el ámbito de los PHA, polímeros biodegradables con gran potencial, se ha estudiado cómo factores como la composición microbiana y la temperatura influyen en su degradación. Las pruebas de laboratorio han confirmado la biodegradabilidad de las películas de PHA, destacando la temperatura como un factor crucial en la velocidad de su biodegradación (Fernandes et al, 2020). Estos estudios subrayan la importancia creciente de desarrollar materiales sostenibles, con un impacto positivo en diversas aplicaciones industriales.

Las fibras de banano, por ejemplo, han ganado atención como una alternativa sostenible a las fibras sintéticas en compuestos de polímeros debido a su alta resistencia, bajo costo, y biodegradabilidad (Jagadeesh et al., 2015; Adeniyi et al., 2019). Estas fibras, a menudo considerados desechos del cultivo de banano, se pueden utilizar como refuerzo en plásticos, ofreciendo un módulo y una ligereza mejorados en comparación con los materiales convencionales (Adeniyi et al., 2019). Los compuestos de fibra de banano se han estudiado ampliamente y los investigadores han comparado sus propiedades mecánicas con otros compuestos de fibra natural como el yute. Además, las hojas y los tallos de banano han demostrado potencial como bio geotextiles para el control de la erosión, con altas concentraciones de macronutrientes, particularmente K y Ca, lo que sugiere que los materiales a base de banano podrían aportar nutrientes al suelo al descomponerse sin correr el riesgo de contaminación por metales pesados (Egbujuo et al., 2018).

- Estabilidad dimensional y Absorción de Agua en Compuestos HDPE-Fibra

Debido a las diferencias en las estructuras químicas de las dos fibras, unir las fibras a la matriz polimérica de Polietileno de alta densidad (HDPE) requiere un tratamiento previo químico o físico. Esto ayuda significativamente a mejorar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos. Las interacciones deficientes durante este proceso pueden causar una mala dispersión de la carga, lo que puede resultar en propiedades mecánicas indeseables (Neher et al., 2020).

La siguiente es la forma en que la fibra se une al polímero:

- a) Deshacerse de las capas límite exteriores frágiles
- b) Construye una capa delgada y adaptable.
- c) En la interfaz reticulada, crear una zona de compresión con un módulo intermedio entre el sustrato y el polímero.
- d) Aumentar la cantidad de humedad presente entre la base y el sustrato.
- e) Crear enlaces covalentes entre ambas fases.
- f) Alterar el fondo.

Las propiedades de estabilidad dimensional y absorción de agua de los compuestos poliméricos reforzados con fibras son cruciales porque afectan directamente su rendimiento y durabilidad en una variedad de aplicaciones. La capacidad de un material para mantener sus dimensiones originales cuando se expone a cambios ambientales como cambios de temperatura y humedad se conoce como estabilidad dimensional. Esta propiedad es particularmente importante para los compuestos poliméricos reforzados con fibra en

aplicaciones donde la precisión dimensional es crucial, como en el sector automotriz, aeroespacial y de construcción (Bui et al., 2020). La introducción de fibras en la matriz polimérica aumenta la estabilidad dimensional del material porque las fibras actúan como elementos de refuerzo que limitan la deformación de la matriz bajo cargas mecánicas o térmicas. Sin embargo, esta mejora depende del tipo de fibra utilizada, su contenido y disposición en la matriz. Las mezclas con buena estabilidad dimensional mantendrán su formay tamaño a lo largo del tiempo, incluso en condiciones adversas, lo cual es fundamental para garantizar la funcionalidad y seguridad del producto final (Nguyen y Indraratna, 2023).

La absorción de agua es otro aspecto importante de los compuestos poliméricos reforzados con fibra, especialmente cuando se exponen a ambientes húmedos o agua. La matriz polimérica, especialmente si es hidrófila, puede absorber agua, provocando la expansión de la red polimérica (Bui et al., 2020). Esta degradación resulta en una transferencia deficiente de tensiones, lo que disminuye las propiedades mecánicas y dimensionales del material. Uno de los principales desafíos al utilizar fibras naturales como refuerzos en compuestos poliméricos es su alta susceptibilidad a la absorción de humedad. Las fibras naturales, compuestas principalmente de celulosa, hemicelulosa, lignina y otros compuestos, tienden a absorber agua del ambiente, lo que lleva al debilitamiento de los enlaces entre la fibra y la matriz (Huang et al., 2021). Este problema es crucial, ya que la absorción de agua provoca que las fibras se hinchen, lo que genera microfisuras en la interfaz fibra-matriz. Estas microfisuras no solo reducen la resistencia mecánica del material, sino que también afectan negativamente su estabilidad dimensional y térmica (Al-Maharma et al., 2020). Para que las fibras naturales se consideren un refuerzo viable en aplicaciones industriales, es esencial abordar y mitigar los efectos adversos de la absorción de humedad. Aunque las fibras naturales ofrecen beneficios como menor costo, menor densidad, y un impacto ambiental reducido en comparación con los materiales convencionales, la absorción de agua sigue siendo un obstáculo significativo para su uso a gran escala. La investigación continua en este campo se enfoca en mejorar la compatibilidad entre las fibras naturales y las matrices poliméricas, así como en desarrollar tratamientos superficiales y técnicas de procesamiento que minimicen la absorción de agua y mejoren la durabilidad de los materiales compuestos (Mohammed et al., 2023).

En general, en función de estos mecanismos, el comportamiento de difusión de los compuestos poliméricos se puede clasificar según la movilidad relativa del penetrante y de los segmentos de polímero, lo que se relaciona con un comportamiento fickiano, no fickiano o anómalo, y un comportamiento intermedio entre fickiano y no fickiano. La difusión de la

humedad en un compuesto depende de factores como la fracción de volumen de fibra, los huecos, la viscosidad de la matriz, la humedad y la temperatura (Dhakal, 2007).

- Impacto del tratamiento de vapor en la estabilidad dimensional de los materiales compuestos

La EV causa una serie de cambios estructurales y físicos en los materiales compuestos, afectando significativamente su estabilidad dimensional. El material compuesto, que generalmente consiste en una matriz polimérica reforzada con fibras naturales o sintéticas, se somete a condiciones extremas de alta presión y temperatura durante este proceso. El tratamiento con vapor beneficia las fibras de los materiales compuestos. Este proceso mejora la adhesión entre la matriz polimérica y la fibra al alterar la superficie de la fibra (Neher et al., 2020). La interfaz mejorada de la matriz de fibra no solo fortalece el material, sino que también minimiza el riesgo de delaminación o agrietamiento, lo cual es importante para mantener la estabilidad dimensional a largo plazo. Además, la EV puede reducir la capacidad de la fibra para absorber agua, una propiedad importante en ambientes húmedos o llenos de agua, donde la absorción de agua puede hacer que el material se hinche, provocando deformación y pérdida de la integridad estructural del compuesto (Othman et al., 2024). Por lo tanto, reducir la hidrofiliidad de la fibra permite un mejor control dimensional, lo cual es importante cuando el material está expuesto a fluctuaciones de humedad. En conjunto, estas ventajas hacen que los compuestos curados con vapor no solo sean más fuertes y duraderos, sino también más confiables en aplicaciones industriales que requieren alta resistencia, resistencia a la deformación y estabilidad dimensional en condiciones ambientales cambiantes. Este proceso da como resultado una mejora significativa en las propiedades generales del material, extendiendo su vida útil y asegurando su desempeño en condiciones difíciles (Anguita et al., 2020).

Los grupos polares en la celulosa de las fibras naturales atraen las moléculas de agua a través de enlaces de hidrógeno, lo que las hace altamente higroscópicas. La absorción de agua causa inestabilidad dimensional, hinchazón y pérdida de propiedades químicas de las fibras como resultado de cambios en el contenido de lignina y la separación de las fibras de la matriz. Todo esto conduce a la pérdida de características mecánicas como la resistencia a la flexión, la adherencia y el impacto. La modificación química de la fibra puede reducir su absorción de humedad mediante la acetilación, la metilación, la cianoetilación, la benzoilación, el tratamiento con permanganato o la acrilación (Rudá et al., 2024).

2.5 Subproductos líquidos obtenidos por explosión con vapor. Análisis de fitotoxicidad

Los subproductos líquidos obtenidos de la EV en el tratamiento de biomasa lignocelulósica contienen una mezcla de compuestos resultantes de la degradación de los componentes estructurales de la biomasa, como la hemicelulosa, la celulosa y la lignina. Durante la EV, la hemicelulosa se hidroliza en condiciones de alta temperatura y presión, liberando monosacáridos (como glucosa, xilosa y arabinosa) y oligosacáridos que son relativamente estables en medios ácidos, pero pueden experimentar reacciones secundarias como deshidratación, fragmentación y condensación, dando lugar a subproductos como furfural, HMF, ácido levulínico, ácido fórmico y compuestos aromáticos que pueden inhibir la fermentación (Jacquet et al., 2015; Josefsson et al., 2002).

La composición de estos subproductos líquidos también depende de las condiciones específicas del proceso, como el tiempo de residencia y la temperatura de explosión. Un tiempo de residencia elevado favorece la hidrólisis completa de la hemicelulosa, promoviendo la solubilización de más componentes, lo que puede ser beneficioso para procesos como la fermentación. Sin embargo, las condiciones más severas pueden aumentar la formación de compuestos inhibidores, lo que puede afectar negativamente la eficiencia de procesos fermentativos posteriores (Luo et al., 2019). Además, estos subproductos contienen fracciones de lignina soluble y polisacáridos degradados que pueden confundirse con lignina en los análisis de Klason. La lignina, al ser parcialmente solubilizada durante la EV, puede volver a condensarse o cambiar su estructura, afectando su comportamiento durante el análisis y en la posterior conversión de la biomasa (Auxenfans et al., 2017).

En cuanto a las propiedades fisicoquímicas, los subproductos líquidos resultantes de la EV también contienen agua en diferentes estados (ligada, libre y vapor de agua), lo cual afecta su comportamiento y reactividad. La EV utiliza agua en estado subcrítico (presión elevada y temperatura entre 100 °C y 374 °C) que presenta características únicas como una constante dieléctrica más baja y una mayor capacidad de solvatación, lo que facilita la extracción de compuestos de polaridad media sin una alta tasa de degradación, debido a los cortos tiempos de reacción involucrados (Sui y Chen, 2015).

- Medición de la fitotoxicidad

La fitotoxicidad es la capacidad de un compuesto para dañar a las plantas a corto o largo plazo. Según la OMS (2017), el daño puede ser general o limitado. Los efectos fitotóxicos se evalúan evaluando la inhibición de la germinación de las semillas y el alargamiento de la radícula. Esto se debe a que durante el proceso de germinación se realizan numerosos

procesos fisiológicos críticos en los que la presencia de sustancias tóxicas podría afectar la supervivencia y el normal desarrollo de la planta. Durante este período de tiempo, las plantas son muy sensibles a las influencias externas negativas, por lo que la inhibición en la germinación y el crecimiento radicular es un indicador directo de efectos biológicos en las plantas (Sobrero, 2004).

La fitotoxicidad se refiere a los efectos tóxicos de las sustancias en el crecimiento, la reproducción y la supervivencia de las plantas. Puede ser causada por varios factores, incluidos herbicidas, nanopartículas y fertilizantes. Los herbicidas, ampliamente utilizados en la agricultura y otras aplicaciones, pueden tener efectos no deseados en plantas y ecosistemas no objetivo (Boutin, 2020). Las nanopartículas, cada vez más frecuentes en los productos de consumo, pueden causar fitotoxicidad al alterar los procesos celulares y generar especies reactivas de oxígeno (Abdul, 2019). La gravedad de los efectos fitotóxicos depende de factores que incluyen la genética de la planta, las condiciones ambientales y las propiedades específicas de la sustancia tóxica (Barbaś et al., 2023).

Las pruebas de fitotoxicidad, en particular las que utilizan el índice de germinación (IG), son cruciales para evaluar la seguridad y la madurez de materiales orgánicos como el compost y los sedimentos, la sensibilidad de las plantas a los contaminantes varía según la especie (Szara et al., 2017). El IG, es un parámetro crucial para evaluar la fitotoxicidad en diversos contextos, incluidos los sedimentos del fondo, el compost y los materiales de desecho. Proporciona información valiosa sobre los posibles efectos inhibidores o estimuladores de estas sustancias en el crecimiento de las plantas (Bozym, 2020). El IG se calcula utilizando las tasas de germinación de las semillas y las mediciones de la longitud de la raíz, lo que lo convierte en un indicador sensible de la madurez química y la idoneidad para el uso agrícola (Varnero et al., 2007). Estas pruebas suelen implicar la exposición de las semillas a extractos acuosos del material que se está evaluando. Los factores que afectan a la fitotoxicidad incluyen sustancias solubles en agua, como compuestos de N y ácidos orgánicos (Wang y Liu, 2010). La confiabilidad de las pruebas de fitotoxicidad basadas en el IG ha sido examinada en diversos estudios. Algunos investigadores, como Szara et al. (2017) y Czerniawska-Kusza (2011), consideran que la prueba de fitotoxicidad es una herramienta eficaz para evaluar la toxicidad en sedimentos. Sin embargo, otros, como Mendes et al. (2021), han señalado la falta de estandarización en los métodos de prueba de fitotoxicidad como una preocupación importante.

- Implicaciones de la fitotoxicidad para el uso agrícola (herbicidas)

La fitotoxicidad es una propiedad de ciertos compuestos, especialmente metabolitos secundarios producidos por plantas, que les permite inhibir el crecimiento y desarrollo de otras especies vegetales en su entorno (Ronco-Campaña, 2018). Estos compuestos fitotóxicos desempeñan un papel crucial en la dinámica de los ecosistemas, ya que pueden alterar la composición y diversidad de la vegetación en distintos hábitats. Además de su influencia ecológica, estos metabolitos han despertado interés científico debido a su potencial aplicación en el control natural de malezas, ofreciendo alternativas más seguras y amigables con el medio ambiente en comparación con los herbicidas sintéticos tradicionales (López-Valdez et al., 2021). Este fenómeno de inhibición vegetal está estrechamente relacionado con la alelopatía, un proceso biológico mediante el cual un organismo, generalmente una planta, produce y libera al medio ambiente metabolitos conocidos como aleloquímicos. Estos compuestos pueden afectar de manera significativa el crecimiento, supervivencia y reproducción de otras especies cercanas, actuando como agentes de competencia o defensa (Chaïb et al., 2021). La alelopatía puede manifestarse a través de diversas partes de la planta, incluyendo hojas, raíces, flores y semillas, y los aleloquímicos pueden ser liberados mediante procesos como la lixiviación, volatilización o descomposición de residuos vegetales. El término "alelopatía" fue introducido por el científico checo austríaco Hans Molisch en 1937, derivado de las palabras griegas *allel* (mutuo) y *pathos* (sufrimiento o afectación), reflejando la interacción mutua y a veces competitiva entre organismos vegetales mediante compuestos químicos (Chaïb et al., 2021).

Entendiendo la interacción entre fitotoxicidad y alelopatía, surge el concepto de bioherbicidas, que son productos diseñados para controlar malezas utilizando compuestos naturales derivados de metabolitos secundarios producidos por diversos organismos vivos, como bacterias, hongos, virus, nematodos y plantas durante su desarrollo (Soltys et al., 2013). La principal ventaja de los bioherbicidas radica en su reducido impacto ambiental en comparación con los herbicidas sintéticos, ya que están formulados con ingredientes naturales y no tóxicos que disminuyen los riesgos de contaminación y daño ecológico. Estos productos pueden integrarse eficazmente dentro de estrategias de manejo integrado de malezas, combinando diferentes métodos para lograr un control más efectivo y sostenible de las especies indeseadas (Hasan et al., 2021). Al igual que los herbicidas convencionales, los bioherbicidas pueden aplicarse de diversas formas, incluyendo pulverización foliar, aplicación al suelo o en forma de gránulos, adaptándose a las necesidades específicas del cultivo y las condiciones ambientales (Bailey, 2014).

2.6 Caracterización de N, K y P de subproductos líquidos resultantes de proceso de explosión con vapor.

La investigación sobre alternativas de acondicionadores de suelo basados en biomasa está experimentando un rápido crecimiento. A diferencia de los fertilizantes químicos convencionales que provienen de fuentes no renovables y a menudo causan impactos ambientales y en la salud humana con su aplicación descontrolada, los acondicionadores de suelos y fertilizantes derivados de biomasa residual, conocidos como biofertilizantes, presentan diversas ventajas. En primer lugar, su preparación se realiza a través de métodos respetuosos con el medio ambiente y con emisiones reducidas de gases de efecto invernadero. Además, se obtienen a partir de biomasa y/o residuos agrícolas renovables, lo que los hace económicamente accesibles. Por último, ofrecen la ventaja de minimizar los riesgos de contaminación ambiental durante su aplicación (Karatas et al., 2022).

La caracterización de N, K y P de productos líquidos surge con la necesidad de aprovechar sus propiedades en los suelos y que estos subproductos líquidos sean utilizados como biofertilizantes. Los fertilizantes han sido un avance importante en la sociedad, estos han aumentado el rendimiento de los cultivos a nivel mundial, el fertilizante se suministra a las plantas con el fin de suministrar elementos esenciales que le hacen falta a la planta para aumentar o mantener el rendimiento de los cultivos (Adekiya et al., 2020). El N, P y K son nutrientes cruciales para la nutrición de las plantas, después del carbono, hidrógeno y oxígeno, y son comúnmente considerados los componentes fundamentales de todos los organismos vivos. En términos de requisitos para las plantas, el N ocupa la posición principal, seguido por P y K. Estos nutrientes son esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que prácticamente todas las plantas los utilizan a lo largo de su ciclo de vida (Yahaya et al., 2023). Una proporción equilibrada de N, P y K opera de manera coordinada en la nutrición de las plantas, fomentando un crecimiento y desarrollo saludables, y en última instancia, mejorando el rendimiento de los cultivos. No obstante, un exceso o deficiencia de estos nutrientes puede manifestarse a través de signos anómalos que deben abordarse para optimizar la productividad vegetal. La manera más efectiva de corregir la deficiencia de cualquier elemento es mediante la aplicación de fertilizantes, los cuales sustituyen los componentes químicos agotados del suelo durante el crecimiento de las plantas, mejorando así la capacidad productiva del suelo (Singh et al., 2020). Mejorar la eficiencia en la utilización de nutrientes en los cultivos sería la solución para abordar los problemas derivados de la baja eficiencia en la utilización de nutrientes. En términos de porcentaje, la baja eficiencia en el uso de nutrientes: 30%-40% para N, 10%-25% para P y 30%-50% para fertilizantes de K aumenta el costo del aporte de fertilizantes y, lo más importante, conduce a problemas

ambientales como la degradación del suelo, la eutrofización del agua y la contaminación del aire (Hao et al., 2023).

3. Materiales y métodos

3.1 Proceso de explosión con vapor

3.1.1 Obtención de la materia prima

La materia prima utilizada fue: hojas de banano (*Musa paradisiaca*) y hojas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). La hoja de banano (*Musa paradisiaca*) se obtuvo mediante la recolección manual en la Finca Alejita (Figura 1), ubicada en el cantón Naranjito, Recinto Matilde Esther, de la provincia del Guayas en Ecuador, se recolectó dos kilogramos. La recolección de hojas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) se obtuvo mediante la recolección en pequeños cultivos pertenecientes a agricultores del cantón Paute, provincia del Azuay (Figura 2).



Figura 7. Ubicación Finca Alejita (Google Maps - ©2024 Google)

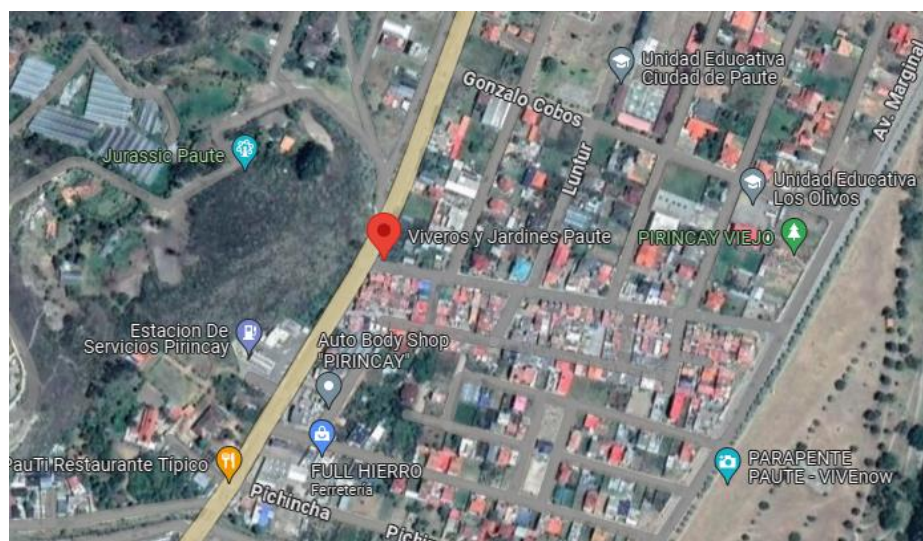


Figura 8. Ubicación viveros Paute (Google Maps - ©2024 Google)

3.1.2 Pretratamiento

Las hojas de banano (*Musa paradisiaca*) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) fueron reducidas manualmente por un proceso de corte a estructuras cuadradas de aproximadamente 2 cm de longitud por 2 cm de ancho. Luego, se colocaron en bandejas de aluminio y se sometieron a un pretratamiento de lavado y secado durante un día a 60°C en la estufa, ubicada en el laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca. Una vez secas, se mezcló la muestra triturada con agua en una relación 1:1, utilizando 200 gramos de muestra triturada y 2 litros de agua.

3.1.3 Extracción de la fibra y obtención del subproducto líquido mediante explosión con vapor

El equipo de EV (Figura 3) se encuentra en el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana. En el equipo se estableció la temperatura de trabajo en 180 °C y el tiempo de residencia como variables independientes, siendo estos de 1 segundo y 10 minutos. La mezcla que proviene del pretratamiento se cargará en el reactor tipo batch del equipo, es entonces que el equipo tomó su tiempo para llegar a la temperatura de trabajo y así librar instantáneamente la presión. Tras la descompresión automática, se extrajo la muestra hidro tratada y se separó en líquido y fibra. La fibra obtenida se secó en la estufa a 60 °C durante 24 horas. Se repitió el proceso con un tiempo de residencia de 10 minutos para muestras de hojas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y hojas de banano (*Musa paradisiaca*). Las muestras líquidas se recogieron en envases plásticos estériles y se almacenaron en refrigeración a una temperatura no mayor a 4 °C, con el fin de mantener sus propiedades.



Figura 9. Equipo de explosión con vapor.

3.2 Análisis de las fibras obtenidas por explosión con vapor

3.2.1 Análisis del contenido de carbono orgánico de las fibras

En la figura 4, se observa procedimiento para la caracterización del contenido de carbono en las fibras tratadas y biomasa no tratada de hojas de banano (*Musa paradisiaca*) y hojas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) donde se siguió el método de Walkley & Black, en el cual se preparó una muestra y un blanco. Inició pesando 0.02 gramos de fibra extraída de la hoja de banano (*Musa paradisiaca*) y 0.03 gramos de fibra extraída de la hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Todas las operaciones se realizaron bajo una campana de extracción. A cada muestra se le añadieron 10 mL de $K_2Cr_2O_7$ y 20 mL de H_2SO_4 . Después de esperar 60 minutos para la reacción, la mezcla se trasvasó a un balón de aforo de 100 mL y se llevó al aforo con agua destilada. De esta solución, se tomó una alícuota de 10 mL, a la cual se añadieron 2 mL de NaF, 1 mL de H_3PO_4 , y dos gotas de indicador de difenilamina, para posteriormente cuantificar el carbono mediante titulación utilizando Sal de Mohr ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$) hasta que se observó un cambio de color a verde brillante, tanto para la muestra como para el blanco. Este mismo procedimiento se repitió para las muestras no tratadas, utilizando 0.02 gramos para las fibras de la hoja de banano (*Musa paradisiaca*) y 0.03 gramos para las fibras de la hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*).



1. Muestras colocadas en crisoles para análisis de Carbono.



2. Adición de $K_2Cr_2O_7$ a las muestras



3. Adición de H_2SO_4 a las muestras.



4. Extracción de alícuotas de la solución aforada.



5. Titulación de las alícuotas extraídas.



6. Coloración final luego de la titulación.

Figura 10. Proceso de caracterización del contenido de carbono en fibras tratadas y biomasa no tratada.

3.2.2 Análisis del contenido nutricional de las fibras

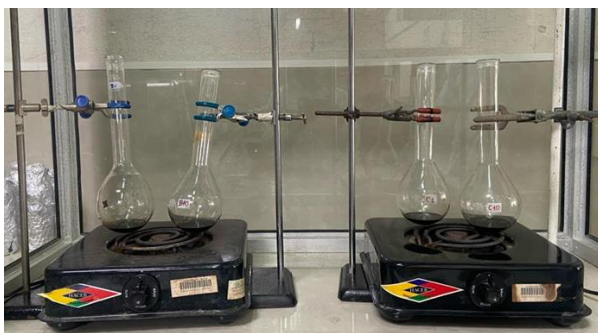
En la figura 5 se observa el proceso para caracterizar el contenido de N en la fibra tratada y el subproducto líquido, es entonces que se siguió los pasos establecidos para el método de Kjeldahl utilizando el sistema de destilación Gerhardt Vapodest 20, localizado en el laboratorio de Análisis de Suelos de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Cuenca. Primero se colocó correctamente los balones Kjeldahl, las planchas de calefacción y los soportes en la campana de extracción. Después, se procedió a pesar 0.02 gramos de muestra para las fibras tratadas y 5 ml para los subproductos líquidos y se agregó en los balones Kjeldahl, con un embudo. Y con una espátula se agregó un gramo de catalizador de proteínas en los balones Kjeldahl. A continuación, se añadió 20 mL de H_2SO_4 , se encendieron las planchas de calefacción y se taparon los balones Kjeldahl con embudos para producir la digestión. Una vez que la solución del interior de los balones alcanzó un color constante, se retiraron los balones y se dejaron enfriar. Posteriormente, se trasvasó las soluciones a balones de aforo y se aforaron con agua destilada. Con una pipeta volumétrica se midieron

50 mL de la solución de KCl y se colocaron en el tubo de condensación correspondiente al equipo de destilación. En un matraz Erlenmeyer se colocaron 25 mL del líquido de la digestión y se añadió dos gotas del indicador Shiro-Tashiro. El tubo de digestión y el matraz Erlenmeyer se colocaron en la parte interior del equipo Gerhardt Vapodest 20, programando la destilación para 10 minutos, durante los cuales la solución se tornó de color verde. Luego, se llenó una bureta con ácido sulfúrico (H_2SO_4) 1N y se tituló la solución hasta que se tornó a color púrpura, indicando una reacción de retroceso. Se siguió el mismo procedimiento para cada una de las muestras a analizar.

Se determinó la cantidad de N en las muestras a analizar mediante el volumen de titulación con H_2SO_4 , calculando así la concentración de amoníaco generado durante la destilación de la muestra. El volumen de H_2SO_4 necesario para neutralizar el amoníaco destilado está directamente relacionado con la cantidad de N presente en las muestras analizadas.



1. Muestras de fibras tratadas en digestión.



2. Muestras de subproductos líquidos en digestión.



3. Balones de aforo con soluciones preparadas según el Método de Kjeldahl.



4. Equipo Gerhardt Vapodest 20 en operación durante el proceso de destilación para determinación de nitrógeno.

Figura 11. Proceso de caracterización del contenido de nitrógeno en fibras tratadas y subproductos líquidos.

En la figura 6 se muestra el proceso para caracterizar el contenido de P en la fibra tratada, utilizando el método de Olsen. Este método emplea una solución de bicarbonato de sodio (NaHCO_3) al 0.5 M, que es ligeramente alcalina (con un pH de 8.5). Para realizar el procedimiento, se pesaron 0.5 gramos de fibra en una balanza analítica y se colocaron en vasos de precipitados de 250 mL. Luego, se añadieron 50 mL de la solución de NaHCO_3 utilizando una pipeta volumétrica, junto con 1 gramo de carbón activado con una espátula. La mezcla se agitó durante 1 hora y se dejó reposar toda la noche. Al día siguiente, se montó un soporte de filtrado con embudo de vidrio, papel filtro y un matraz de 250 mL para cada muestra, con esto armado, la solución filtrada se vertió en el embudo de vidrio con cuidado para evitar derrames y se esperó a que la filtración se completara. Concluida la filtración, se recogió el extracto y se cubrió la boca del matraz con papel aluminio. Es entonces que, se tomó 0.5 gramos del extracto con una pipeta volumétrica de 1 mL y se añadió 10 mL de agua destilada, 10 mL de solución mixta y 6 mL de ácido ascórbico; se aforó con una piseta con agua destilada en un balón de aforo de 100 mL. Se prepararon patrones de 0.5, 2, 3 y 4 ppm en balones de aforo de 100 mL a partir de la solución preparada. Se midió la absorbancia de cada patrón en un espectrofotómetro UV-VIS, creando una curva de calibración a partir de un blanco y yendo de forma ascendente. Finalmente, se midió la absorbancia y la concentración de P de cada muestra y se registró los datos obtenidos. El mismo procedimiento se repitió para los subproductos líquidos, utilizando un peso de 2.5 gramos.



1. Fibras tratadas sumergidas en la solución de NaHCO_3



2. Filtración de las muestras.



3. Solución patrón y soluciones de muestras.



4. Lectura en el espectrofotómetro UV-VIS.

Figura 12. Proceso de caracterización del contenido de fósforo de la fibra tratada y del subproducto líquido.

En la figura 7 se visualiza la caracterización del contenido de K en la fibra tratada. En este proceso se pesó 0.25 gramos de fibra tratada y se adicionaron 50 mL de acetato de amonio 1 N con una pipeta volumétrica de 50 mL, esta mezcla se agitó manualmente y se dejó reposar durante toda una noche para saturar los sitios de carga. Al día siguiente, cuando la muestra se había decantado, se filtró el sobrenadante a través de papel filtro. Luego se añadió 25 mL de solución de acetato de amonio, se agitó y se dejó reposar para que decantara nuevamente. El sobrenadante se pasó otra vez por el mismo papel filtro, repitiendo este proceso hasta completar 100 mL de la solución de acetato de amonio. Después, se completó el aforo con agua destilada y se midió la concentración de K utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica "The Varian SpectrAA-55B". Se repitió el mismo procedimiento para los subproductos líquidos, utilizando un peso de 10 gramos.



1. Muestras con acetato de amonio.



2. Filtración de las muestras.



3. Filtración de las muestras con subproductos líquidos.



4. Determinación de potasio mediante espectrofotómetro de absorción atómica.

Figura 13. Proceso de caracterización de potasio de las fibras tratadas y subproductos líquidos.

3.2.3 Evaluación de la biodegradabilidad de fibras obtenidas mediante el proceso de explosión con vapor

Con el fin de evaluar la biodegradabilidad de las fibras obtenidas mediante el proceso de EV, se siguió los lineamientos de la Norma NTE INEN 2642:2012, la misma que establece el método de ensayo para determinar la biodegradación aeróbica en el suelo, la cual requiere un acondicionamiento previo del suelo para cumplir con parametros de: pH, humedad y un tamaño de partícula de 2 mm. Es entonces que para realizar estos análisis previos se busca seleccionar un suelo apto.

a) Acondicionamiento del suelo

- Obtención y selección del suelo:

Para seleccionar un suelo que cumpla con la condición de pH entre 6 y 8 requerida para el análisis de biodegradabilidad se tomaron muestras representativas en lugares estratégicos presentados en la tabla 2, para su posterior análisis. Debido a que los suelos presentan gran variabilidad, es decir cambian de composición química y por lo tanto de pH, de un lugar a otro, aunque aparentemente el terreno tiene una gran semejanza por lo que fue necesario seguir una serie de pasos para tomar muestra representativa de cada lugar seleccionado. La muestra de suelo se recolectó en una zona que presenta condiciones homogéneas en cuanto a sus características físicas y químicas. Para asegurar la representatividad de la muestra, se realizaron entre 15 y 20 submuestras distribuidas estratégicamente a lo largo del terreno, siguiendo un patrón de zigzag. Este método permite cubrir de manera uniforme toda el área de interés, garantizando que se capten las variaciones posibles dentro de la parcela. Posteriormente, las submuestras se mezclaron en una recipiente limpio y seco mostrado en la figura 8, para obtener una muestra compuesta, la cual refleja con mayor precisión las

propiedades promedio del suelo en estudio, y se tomó aproximadamente 2 libras de la mezcla y se depositó en una funda plástica Ziploc con cierre hermético con dimensiones de 28.6 x 7.5 cm. Esta muestra compuesta se llevó al laboratorio como “representativa” del área en la que se tomó. Este procedimiento se repitió para cada área seleccionada. Se identificaron 8 lugares estratégicos descritos en la tabla 2:

Tabla 3. Ubicación y coordenadas de las muestras de suelo analizadas.

N° Muestra	Lugar	Coordenadas
1	Azogues, parroquia Guapán, barrio la Calera.	(-2.7192170°, -78.8471362°)
2	Azogues, parroquia Guapán, Guindilig.	(-2.7179308°, -78.8446247°)
3	Huerto de la universidad de Cuenca, campus Yanuncay	(-2.9200486°, -79.0251831°)
4	Invernadero de la universidad de Cuenca, campus Yanuncay	(-2.9206878°, -79.0248909°)
5	Huerto de la universidad de Cuenca, campus Balzay	(-2.8910490°, -79.0383043°)
6	Parroquia Nulti 1, Cuenca, Azuay	(-2.866611°, -78.929361°)
7	Parroquia Nulti 2, Cuenca, Azuay	(-2.857749°, -78.860949°)
8	Parroquia Nulti 3, Cuenca, Azuay	(-2.856917°, -78.861663°)



Figura 14. Toma de una muestra de suelo.

- Determinación de pH del suelo

Una vez en el laboratorio se esparcieron las muestras de suelo sobre papel periódico de forma homogénea, para dejarlas secar por 48 horas aproximadamente a temperatura ambiente. Pasadas las 48 horas, se realizó un tamizado con un tamiz malla N° 12 de prueba ASTM E11, con el fin de separar las partículas grandes que podrían afectar el resultado. Posterior al tamizado, se tomó cada muestra y se pesó 10 gramos de muestra de suelo en un vaso de precipitado de 150 ml y se agregó agua destilada en una relación de suelo- agua destilada de 1:2.5. Se agitó durante 1 hora aproximadamente y se dejó en reposo durante 15 minutos y con un medidor de pH “Thermo Scientific Medidor de sobremesa Orion Versa Star Pro con módulo de pH/Log R/mV y Soporte” (figura 9) se procedió a tomar lectura de cada muestra de suelo sumergiendo el electrodo dentro de la solución, verificando que el electrodo esté completamente sumergido. Este procedimiento se realizó con cada muestra de suelo mencionada en la tabla 2.



Figura 15. Potenciómetro Thermo Scientific Orion Versa Star Pro.

- Análisis de humedad de la muestra de suelo seleccionada

El análisis de humedad de la muestra de suelo seleccionada, se realizó mediante análisis gravimétrico donde se empezó pesando un crisol vacío de porcelana en una balanza analítica. Luego se procedió a pesar 50 gramos de la muestra de suelo seleccionada y se colocó en la estufa a 105° C durante 24 horas y se dejó enfriar en un desecador, durante 10 minutos aproximadamente, para aislar la muestra de la humedad del laboratorio y se vuelve a pesar. Se realiza las veces que sean necesarias hasta obtener un peso constante, tal como se muestra en la figura 10.



1. Muestra de suelo



2. Cuarteo de la muestra de suelo.



3. Pesaje de la cápsula vacía.



4. Pesaje de 50 gramos de la muestra de suelo.



5. Muestras de suelo en la estufa a 105°C.



6. Pesaje final hasta obtener un peso constante.

Figura 16. Proceso de análisis de humedad de la muestra de suelo seleccionada

- Tamizado de la muestra de suelo seleccionada

En el laboratorio se esparció la muestra de suelo sobre papel periódico de forma homogénea, tal como se muestra en la figura 11, para dejarla secar por 48 horas aproximadamente a temperatura ambiente. Pasadas las 48 horas, se realizó un tamizado con un tamiz Malla N° 12 de prueba ASTM E11. Este procedimiento se realizó con el fin de separar las partículas

grandes que podrían afectar el resultado en la evaluación de la biodegradabilidad aeróbica de las fibras obtenidas en el proceso de EV.



Figura 17. Tamizado de la muestra de suelo.

b) Montaje de la prueba de biodegradación por titulación de CO₂

Una vez determinado el suelo que cumple con las condiciones adecuadas dictadas por la norma, se inició el ensayo de la biodegradabilidad aeróbica de las fibras obtenidas en el proceso de EV. Para llevar a cabo el ensayo, se buscaron recipientes similares a un desecador de 150 mm, se encontraron domos para pastel de 28 cm de diámetro de dos piezas, los cuales son recipientes con un volumen interno de 5 litros, con sellado hermético similar a las características de un desecador. La prueba se realizó en triplicado, utilizando un total de 30 recipientes presentados en la tabla 3.

Tabla 4. Grupos de muestras analizados en el ensayo

Grupo de muestra	Cantidad	Contenido	Observaciones
Suelo	3	Suelo	
Control técnico	3	Material adsorbente (KOH)	
Control positivo 1	3	Hojas de caña (<i>Saccharum officinarum</i>) sin tratar	
Control positivo 2	3	Hojas de banano (<i>Musa paradisiaca</i>) sin tratar	

Material de ensayo 1	3	Fibra de hoja de banano (<i>Musa paradisiaca</i>), tiempo de residencia 1 segundo	
Material de ensayo 2	3	Fibra de hoja de banano (<i>Musa paradisiaca</i>), tiempo de residencia 10 minutos.	
Material de ensayo 3	3	Fibra de hoja de caña (<i>Saccharum officinarum</i>), tiempo de residencia 1 segundo	
Material de ensayo 4	3	Fibra de hoja de caña (<i>Saccharum officinarum</i>), tiempo de residencia 10 minutos.	
Material de ensayo 5	3	Material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras extraídas de la hoja del banano (<i>Musa paradisiaca</i>).	Producidas por docentes de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana
Material de ensayo 6	3	Material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras extraídas de la hoja de la caña (<i>Saccharum officinarum</i>).	Producidas por docentes de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana

Una vez seleccionado el tipo de suelo con un valor de pH dentro del rango permitido (6-8) se agregó 500 g del suelo seleccionado en los recipientes correspondientes para cada tipo de ensayo. Las muestras debían cumplir con un contenido de carbono requerido (1000 mg de carbono para los 500 g de suelo). Para ello, se determinó previamente el contenido de carbono mediante el método Walkley-Black, descrito en el punto 3.2.1, con el fin de pesar y alcanzar el contenido necesario. Pesadas las cantidades necesarias de fibras, estas se mezclaron exhaustivamente con el suelo. Se realizó un pesaje inicial del recipiente más la tapa para llevar un control de la pérdida de humedad. Luego, en cada recipiente se colocaron dos vasos sobre el suelo previamente colocado. El vaso uno correspondía a un vaso de

precipitación de 100 ml al cual se añadieron 20 ml de una solución de hidróxido de potasio (KOH) 0,5 N, y en el vaso dos, que, debido a la falta de recursos, se optó por utilizar vasos plásticos reciclables, se colocaron 50 ml de agua destilada para mantener la humedad del ambiente. Los recipientes se sellaron y se colocaron en una cámara oscura a 21 °C. Para el análisis de CO₂, se realizaron titulaciones ácido-base durante las primeras tres semanas cada tres días, y posteriormente, se llevaron a cabo semanalmente por un periodo de 3 meses. El CO₂ producido reaccionó con el KOH formando carbonato de potasio. El KOH restante se tituló con HCl 0.25 N utilizando fenolftaleína como indicador. Se removieron y titularon las trampas de KOH antes de que superaran su capacidad, manteniendo un control de la humedad del suelo agregando agua destilada periódicamente. Los recipientes se dejaron reposar abiertos siguiendo un control de tiempo pues debían permanecer abiertos un mínimo de 15 minutos y un máximo de una hora, luego de ello se volvieron a sellar los recipientes después de colocar KOH fresco. Una vez completado el ensayo, los resultados se presentaron mediante curvas de biodegradación. La finalización del ensayo se determinó cuando la tasa de evolución del CO₂ alcanzó un estado estacionario. Posteriormente, se midió y registró el pH, el contenido de humedad presente en el suelo y temperatura. En la figura 12 se presenta el diagrama de flujo del proceso.

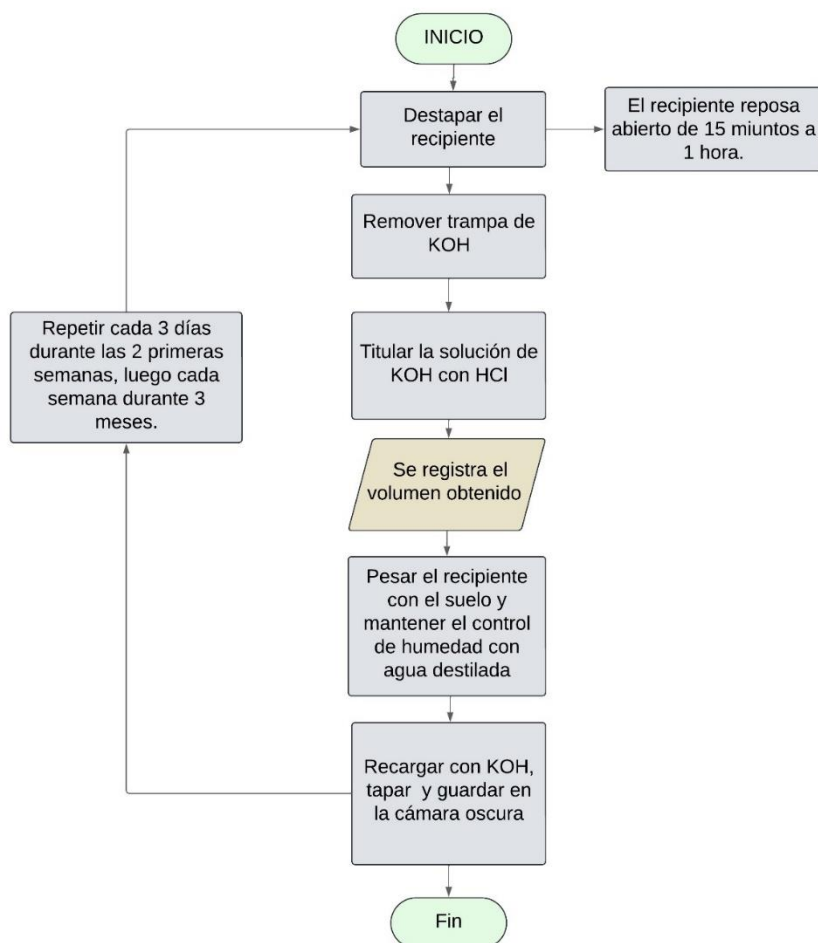
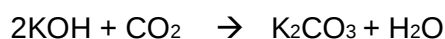


Figura 18. Diagrama de flujo correspondiente al procedimiento para análisis de biodegradabilidad de fibras tratadas.

El CO_2 que se produce reacciona con la solución de KOH, según la siguiente reacción:



El hidróxido remanente se determina por titulación con HCl. Con la relación estequiométrica de la reacción entre el KOH y el CO_2 que reaccionaron. El porcentaje de biodegradación se reporta respecto al contenido teórico de carbono, según la siguiente ecuación:

$$\% \text{ biodegradación} = \frac{\text{moles } \text{CO}_2 \text{ producidos}}{\text{moles de C teórico}} * 100$$

- Biodegradación por pérdida de peso

Además del porcentaje de biodegradabilidad, se midió el porcentaje de pérdida de peso. Para ello, se registró el peso inicial de las fibras y de los compuestos HDPE-fibra, tanto para las fibras de hoja de banano (*Musa paradisiaca*) como para las fibras de hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Una vez que las muestras fueron expuestas durante el período

experimental, que duró 90 días, se volvieron a pesar al finalizar la exposición, lo que permitió evaluar la degradación física experimentada por las fibras durante el ensayo. A partir de estos datos, se calculó el porcentaje de pérdida de peso utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Pérdida de peso} = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso inicial}} * 100$$

3.2.4 Evaluación de la biodegradabilidad de materiales compuestos HDPE-Fibra

Este estudio se centra en la fabricación de materiales compuestos con matriz polimérica de HDPE, obtenidos del reciclaje de tapas de botellas. Estos compuestos están reforzados con fibras extraídas de hojas de banano (*Musa paradisiaca*) y de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Se trabajó con tres formulaciones diferentes, que corresponden a contenidos de fibra del 20%, 30% y 40%. Esto permitió evaluar el efecto de la proporción de refuerzo en las propiedades finales del material compuesto. Estos compuestos, desarrollados y proporcionados por docentes de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana, fueron suministrados en el marco del proyecto “Aprovechamiento de desechos lignocelulósicos agroindustriales y materiales poliméricos de reciclaje para la producción de compósitos plástico-madera y bioetanol” llevado a cabo en colaboración con el Departamento de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC) y la Universidad Politécnica Salesiana. Destacan por su uso de recursos naturales renovables, lo que los convierte en una alternativa para aplicaciones industriales y tecnológicas que buscan reducir el impacto ambiental. Para la evaluación de la biodegradabilidad de los compuestos, se siguió el procedimiento descrito en el punto 3.2.3.

3.2.5 Análisis de la Absorción de Agua en compuesto HDPE-fibra

Para investigar la estabilidad dimensional de compuestos plástico-fibras producidos con las fibras tratadas se aplican el procedimiento establecido por la norma ASTM D570-98, en primera instancia se procedió a obtener muestras representativas del material compuesto. En este caso, las muestras representativas fueron realizadas por docentes de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana, las mismas fueron entregadas para realizar la investigación. Es entonces que, las muestras, se sumergen en agua destilada en depósitos cuadrangulares de Vidrio a 23 °C durante 24 horas, sin la presencia de luz. Posteriormente, se retiran, se secan con un paño y se pesan inmediatamente en una balanza analítica. Los pesajes se repiten al final de la primera semana y, a continuación, cada dos semanas, hasta que el aumento de peso por cada período de dos semanas, según muestran tres pesajes consecutivos, sea inferior, como promedio, al 1 % del aumento total de peso o a 5 mg, si esta cifra es superior; entonces se considerará que el espécimen está

sustancialmente saturado. La diferencia entre el peso sustancialmente saturado y el peso en seco se considera como el agua absorbida cuando esté sustancialmente saturado (Figura 13).

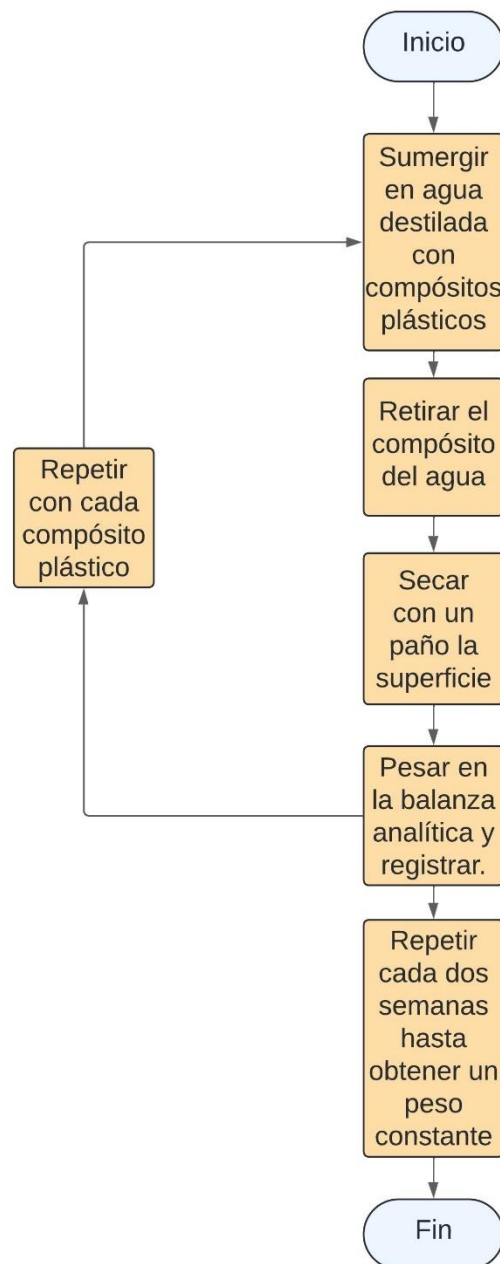


Figura 19. Diagrama de flujo del proceso de estabilidad dimensional.

3.3 Análisis de los líquidos obtenidos por explosión con vapor

3.3.1 Análisis del contenido nutricional de los líquidos

El análisis del contenido nutricional de los líquidos se realizó de la misma forma que el proceso del análisis del contenido nutricional de las fibras mencionado en el punto 3.2.1 del presente documento.

3.3.2 Evaluación de la fitotoxicidad de los líquidos

Para analizar la fitotoxicidad de los subproductos líquidos, se consiguió cajas estériles Petri, donde se colocó un círculo de papel filtro en el fondo de cada caja Petri. Se utilizaron 10 semillas de lenteja y 10 de trigo. Se preparó un grupo de control con 10 semillas de cada tipo y se replicó el proceso tres veces para cada tipo de semilla. En el grupo de control, se colocaron semillas con agua destilada en una cantidad equivalente a la utilizada en las cajas de prueba, para comparar los efectos. Se utilizó una pipeta estéril de vidrio de 10 mL para aplicar 5 mL del líquido de manera uniforme sobre las semillas y el papel filtro en las cajas de prueba, asegurando que las semillas estuvieran en contacto con el líquido, pero evitando la saturación excesiva. Todas las cajas de Petri, tanto las de prueba como las de control, se colocaron en un ambiente oscuro a temperatura ambiente, durante un período de exposición de 5 días, como se observa en la figura 14. Se realizaron controles diarios durante el período de exposición, observando el crecimiento, la salud de las plantas, la germinación y registrando cualquier signo de fitotoxicidad. Al final del período de exposición, se registraron los resultados, incluyendo el número de semillas que germinaron, la altura de las plántulas, el estado de las hojas, el crecimiento radicular relativo y cualquier signo de fitotoxicidad. Los resultados del grupo de prueba se compararon con el grupo de control para evaluar los efectos del líquido subproducto. Finalmente, se utilizaron herramientas estadísticas para analizar los datos y determinar si el líquido tenía un efecto significativo en las semillas de lenteja y trigo en comparación con el grupo de control.



Figura 20. Disposición de semillas en placas de Petri utilizadas para el control y con los subproductos líquidos.

Al final del período se registraron los datos, para cuantificar el efecto de la fitotoxicidad y comparar los resultados entre tratamientos, se emplea la siguiente ecuación donde se expresa el índice de germinación:

$$\text{Índice de germinación (\%)} = \frac{\% \text{ de germinación relativo} \times \text{crecimiento de radícula relativo}}{100}$$

Los datos a registrar incluyen al número de semillas que germinaron, el crecimiento radicular relativo y cualquier signo de fitotoxicidad, para así comparar los resultados del grupo de prueba con el grupo de control para evaluar los efectos del líquido subproducto. Este procedimiento permite llevar a cabo el estudio de fitotoxicidad a corto plazo.

4. Resultados y discusión

4.1 Obtención de fibras y subproductos líquidos a partir del proceso de explosión con vapor

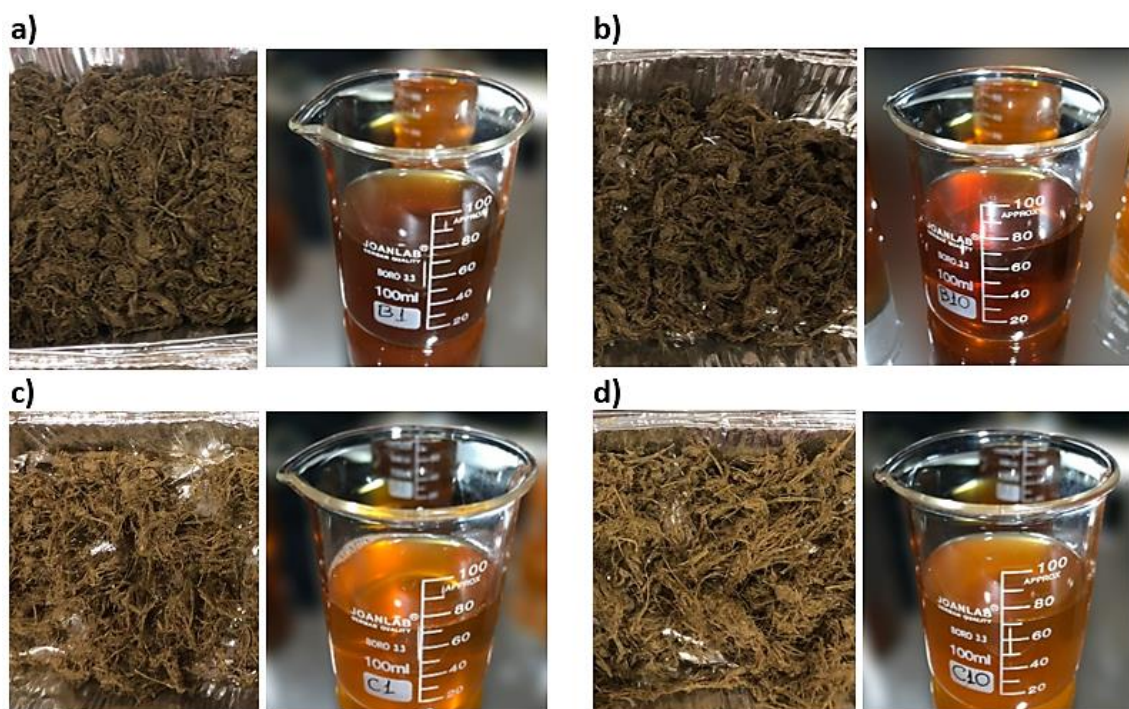


Figura 21. Fibras y subproductos líquidos obtenidos mediante explosión con vapor tras dos tiempos de residencia diferentes, a partir de biomasa lignocelulósica. Las muestras corresponden a: (a) Hojas de banano tratadas por 1 segundo, (b) Hojas de banano tratadas por 10 minutos, (c) Hojas de caña de azúcar tratadas por 1 segundo, y (d) Hojas de caña de azúcar tratadas por 10 minutos.

El proceso de EV a 180 °C, con tiempos de residencia de 1 segundo y 10 minutos, generó cuatro tipos de fibras. Cada extracción de fibra produjo un subproducto líquido correspondiente, resultando en un total de cuatro tipos de fibras y cuatro subproductos líquidos (Figura 15). Para facilitar la identificación y manejo de las muestras en los análisis siguientes, se asignaron nombres específicos a cada tipo de fibra obtenida.

Las denominaciones asignadas fueron las siguientes:

Fibra de hoja de banano (*Musa paradisiaca*) con 1 segundo de tiempo de residencia: B1

Fibra de hoja de banano (*Musa paradisiaca*) con 10 minutos de tiempo de residencia: B10

Fibra de hoja de caña (*Saccharum officinarum*) con 1 segundo de tiempo de residencia: C1

Fibra de hoja de caña (*Saccharum officinarum*) con 10 minutos de tiempo de residencia: C10

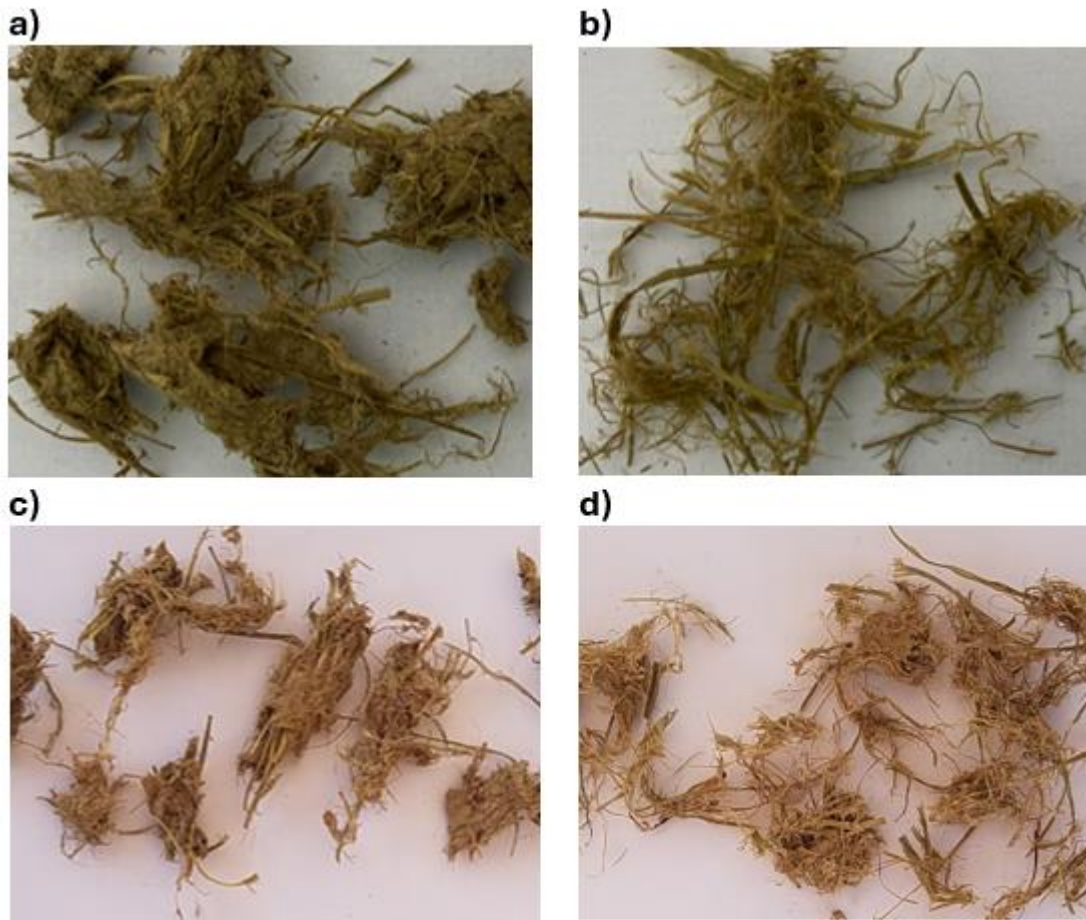


Figura 22. Fibras obtenidas a) Fibra hoja de banano tiempo de residencia 1 segundo; b) Fibra hoja de banano tiempo de residencia 10 minutos; c) Fibra hoja de caña tiempo de residencia 1 segundo; d) Fibra hoja de caña tiempo de residencia 10 minutos.

En la figura 16 sección a), se observan las fibras de hoja de banano (*Musa paradisiaca*) tratadas durante 1 segundo. Estas fibras son relativamente largas y bien definidas, mostrando una estructura fibrosa compacta. En comparación, en la sección b) presentamos las fibras de hoja de banano (*Musa paradisiaca*) tratadas durante 10 minutos. Estas fibras son más finas y están más dispersas, indicando una desagregación mayor debido al tiempo prolongado de exposición al vapor. En la sección c) se muestra las fibras de hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) con un tiempo de residencia de 1 segundo. Similar a las fibras de banano (*Musa Paradisiaca*) con el mismo tiempo de tratamiento, estas fibras de la hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) son largas y muestran una estructura fibrosa compacta. Por último, en la sección d) se presenta las fibras de hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) tratadas durante 10 minutos. Al igual que con las fibras de hoja de banano (*Musa Paradisiaca*) de mayor tiempo de tratamiento, estas fibras de la hoja de la hoja

de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) son más delgadas y dispersas, evidenciando un mayor grado de descomposición y separación de las fibras individuales.

Para evaluar el rendimiento del proceso de EV y la producción de fibras, se realizó un análisis del peso inicial y final de las fibras obtenidas. Este análisis permitió calcular el rendimiento en peso. El rendimiento en peso se definió como la relación entre el peso final de las fibras secas y el peso inicial de la materia prima, expresado como un porcentaje lo que nos permite determinar la cantidad de fibra recuperable a partir de hojas de banano (*Musa Paradisiaca*) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), visualizado en el siguiente ejemplo:

$$\text{Rendimiento del B1} = \frac{7,19}{200} * 100 = 3.59 \%$$

A continuación, la tabla 4, presenta los datos obtenidos para cada tipo de fibra:

Tabla 5. Peso inicial, peso final y rendimiento en peso de las fibras obtenidas mediante explosión con vapor.

FIBRA	Peso Inicial (gr)	Peso final (gr)	Rendimiento (% m/m)
B1	200	7.19	3.59
B10	200	6.19	3.10
C1	200	5.58	2.79
C10	200	5.34	2.67

Los resultados presentados en Tabla 4 indican que, en general, un mayor tiempo de residencia (10 minutos) en las fibras de hoja de banano (*Musa paradisiaca*) produce un menor rendimiento en comparación con un tiempo de residencia más corto (1 segundo), comportamiento que también se puede apreciar en las fibras de hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), aunque con variaciones más pequeñas. Como la materia prima está compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina, la alta temperatura y presión a la cual es sometida en el proceso de EV, rompen los enlaces de estos componentes y estas condiciones hacen que la hemicelulosa y parte de la lignina tiende a solubilizarse más fácilmente, es por eso que los porcentajes de rendimientos, corresponden a celulosa o lignina más resistente que no fue descompuesta o solubilizada durante el tratamiento.

Además del tiempo de residencia, otros factores también influyen en el rendimiento en la extracción de fibras, tales como la variedad botánica de la planta, el método de extracción empleado y la región de la planta de donde se obtiene la fibra: Preethi y Balakrishna Murthy (2013) analizaron dos especies de banano (*Musa acuminata* y *Musa paradisiaca*) y reportaron un rendimiento de extracción de fibra del 1.07% para la especie *Musa acuminata* y del 2.71% para la especie *Musa paradisiaca*. Por otro lado, Divya et al. (2016) destacan el impacto del método de extracción en el rendimiento de fibras de hojas de banano (*Musa paradisiaca*), evidenciando que el método mecánico proporciona un rendimiento superior (1.172%) en comparación con el tratamiento químico, donde el uso de una solución de NaOH al 0.75% alcanzó un rendimiento de solo 0.328%. Estos valores indican que el método mecánico conserva mejor la estructura de la fibra, mientras que el uso de agentes químicos, aunque efectivo para la separación de fibras, disminuye el rendimiento debido a la degradación de componentes estructurales. Hoi y Martincigh (2013) identifican variaciones significativas en el contenido de fibra entre el tallo y la hoja. La hoja seca proporciona un rendimiento superior (1.402%) frente al tallo (0.571%). Esto se debe a las diferencias en la proporción de fibras estructurales y otros compuestos lignocelulósicos entre las distintas partes de la planta, lo cual afecta la eficiencia de extracción y la calidad de las fibras obtenidas.

En el peso final existe una reducción considerable en el volumen del material, lo que es altamente beneficioso en términos de almacenamiento. El volumen reducido de fibra permite que el material ocupe menos espacio, facilitando su manipulación y optimizando los recursos logísticos, tanto en su transporte como en su almacenamiento a largo plazo, además la fibra es compacta y seca, reduciendo así el riesgo de descomposición durante el almacenamiento, en comparación con un residuo de una hoja de banana u hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), que en su estado natural es voluminosa y está compuesta por altos niveles de humedad.

4.2 Contenido de carbono orgánico en fibras

El análisis del contenido de carbono en las fibras obtenidas y en las hojas se realizó con el fin de evaluar el impacto del tratamiento de EV en la composición química de los materiales. Los resultados del análisis del contenido de carbono orgánico en las hojas de banano (*Musa paradisiaca*) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), así como en las fibras obtenidas después del tratamiento se presentan a continuación:

Tabla 6. Análisis de carbono orgánico en materias primas y fibras obtenidas

MATERIAL/FIBRA	C ORGÁNICO (% m/m)
HOJAS DE BANANO (<i>Musa paradisiaca</i>)	31.51
HOJAS DE CAÑA (<i>Saccharum officinarum</i>)	14.89
B1	59.29
B10	37.64
C1	29.59
C10	50.08

Los resultados obtenidos en la Tabla 5 de este estudio indican diferencias significativas en el contenido de carbono orgánico entre las hojas sin tratar y las fibras extraídas mediante EV. Se observó que las hojas de banano (*Musa paradisiaca*) poseen un mayor contenido de carbono orgánico (31.51%) en comparación con las hojas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) (14.89%). Este contraste se explica, en parte, por las distintas proporciones de celulosa, hemicelulosa y lignina entre ambas biomásas. En las hojas de banano (*Musa paradisiaca*), la celulosa representa un porcentaje mayor (56-67%), seguido de la hemicelulosa (8-15%) y lignina en menor proporción (10-12%) (Calampa Torres, 2000). Por otro lado, las hojas de caña (*Saccharum officinarum*) presentan mayores contenidos de lignina (20-30%) y hemicelulosa (20-30%) (Palaniyappan, 2016), lo que las hace menos propensas a la degradación bajo tratamientos térmicos breves debido a la estructura resistente de la lignina, como se ha mencionado en estudios previos (Beckham, 2018).

Tras el tratamiento con EV, el contenido de carbono en las fibras de ambas plantas aumentó considerablemente, lo que sugiere una transformación estructural en la biomasa lignocelulósica. Esto se debe al proceso de descomposición de lignina y hemicelulosa, facilitando el acceso a la celulosa, componente más rico en carbono (Steinbach et al., 2020). Sin embargo, el tiempo de residencia afectó de forma diferente a cada tipo de hoja. En las fibras de hoja de banano (*Musa paradisiaca*), el tratamiento de 1 segundo (B1) resultó en un contenido de carbono orgánico del 59.29%, casi duplicando el valor inicial, mientras que el

tratamiento de 10 minutos (B10) redujo el contenido a 37.64%. Esto puede atribuirse a una mayor pérdida de carbono en tratamientos largos debido a la volatilización de compuestos y posible degradación excesiva de la celulosa.

En las hojas de caña (*Saccharum officinarum*), el comportamiento fue inverso: las fibras tratadas por 10 minutos (C10) mostraron un incremento mayor en el contenido de carbono (50.08%) en comparación con las tratadas por 1 segundo (C1), que presentaron un 29.59%. Esta diferencia puede explicarse por la estructura compleja de la lignina en las hojas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), que requiere tiempos de tratamiento más largos para su descomposición. Este fenómeno ha sido reportado en estudios previos, donde se describe que un tratamiento prolongado es esencial para romper la estructura de lignina en biomásas con altos contenidos de este polímero, como en las hojas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) (Beckham, 2018; Palaniyappan, 2016). Además, los resultados obtenidos coinciden con los reportados por Hoi y Martincigh (2013), quienes encontraron que el contenido de carbono en hojas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) varía según el estado de la hoja, con valores de 39.11% en hojas verdes y hasta 45.20% en hojas secas. Este patrón respalda la observación de que las hojas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), son más resistentes a la degradación, lo que justifica la necesidad de tratamientos prolongados para liberar la celulosa y aumentar el contenido de carbono en las fibras.

La comparación con otros estudios permite evaluar cómo la variabilidad entre especies y condiciones de procesamiento influye en los resultados. En las fibras de hojas de banano (*Musa paradisiaca*), Jústiz-Smith et al. (2008) reportaron un contenido de carbono del 50.9%, celulosa de 43.26%, hemicelulosa de 38.54% y lignina de 9% para fibras extraídas mecánicamente de una especie de banana dentro de la familia Musaceae. En el presente estudio, las fibras de *Musa paradisiaca* tratadas por 1 segundo (B1) alcanzaron valores de carbono más altos (59.29%), lo cual podría atribuirse a la degradación selectiva de hemicelulosa y lignina mediante el proceso de EV. Esta diferencia sugiere que el método de extracción afecta considerablemente el contenido final de carbono y la estructura de las fibras. En otro estudio, Fernandes et al. (2013) observaron variaciones significativas en los contenidos de celulosa y carbono entre hojas frescas y semisecas de *Musa cavendishii*, con contenidos de celulosa de hasta 53.5% en hojas frescas y menores en hojas semisecas debido a la acción microbiana. Esto destaca cómo el estado de las hojas y la degradación microbiana pueden afectar la composición de las fibras, incluso dentro de una misma familia de banana.

4.3 Contenido nutricional de las fibras para fines agrícolas

En la tabla 6, se registran los resultados obtenidos en el análisis de N, P y K de las fibras tratadas:

Tabla 7. Contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en las fibras de hojas de banano y caña de azúcar tratadas mediante explosión con vapor.

	B1	B10	C1	C10
Contenido de N (% m/m)	1.59	1.98	1.60	1.58
Contenido de P (pmm)	0.497	0.612	0.480	3.512
Contenido de K (ppm)	0.438	0.797	0.438	0.436

Los resultados obtenidos muestran que las fibras tratadas mediante EV de hojas de plátano (*Musa paradisiaca*) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) presentan concentraciones de N entre 1.58% y 1.98%, mientras que los contenidos de P y K son considerablemente bajos, con valores que no superan el 0.001. % para ambos elementos. A pesar de la presencia de estos nutrientes esenciales, los niveles están muy por debajo de los mínimos requeridos para que las fibras puedan considerarse fertilizantes efectivos. Los fertilizantes comerciales suelen contener al menos un 3% de N, P o K para ser viables en aplicaciones agrícolas.

Al comparar estos resultados con estudios previos sobre hojas sin tratar, se observa que las hojas de plátano tienen un promedio de 2.13% de N y 2.97% de K (Prasomsook, 1973), mientras que las hojas de caña de azúcar contienen 1.6% de N, 1% de P y 0.2% de K en materia seca (Wood, 1990). En contraste, las fibras tratadas muestran una disminución notable en los niveles de P y K, mientras que el contenido de N es comparable en el caso de la caña de azúcar y ligeramente inferior en las fibras de plátano.

Esta diferencia en los valores de P y K podría explicarse por su movilización hacia las fracciones líquidas durante el proceso de EV, tal como lo han documentado estudios previos. Según Vanicková et al. (2014), los elementos como el P y el K se solubilizan y se desplazan hacia los subproductos líquidos durante el procesamiento de biomasa lignocelulósica mediante EV. Los resultados del análisis de los subproductos líquidos en este estudio confirman esta observación, ya que se detectan pequeñas concentraciones de P y K en

dichas fracciones, lo que justifica su baja retención en las fibras.

En cuanto al N, los resultados muestran que no se detecta en las fracciones líquidas (Tabla 12), lo que plantea una pregunta sobre su destino durante el tratamiento. La ausencia de N en la fracción líquida se puede atribuir a la naturaleza de los compuestos nitrogenados en los materiales vegetales. El N en las hojas está mayormente presente en formas orgánicas complejas, como proteínas y compuestos asociados con la lignina, que tienen una baja solubilidad en agua y no se liberan fácilmente durante el tratamiento térmico y de presión. A diferencia del P y el K, los compuestos nitrogenados tienden a permanecer en la matriz sólida, como también lo sugiere Vanicková et al. (2014). Por lo tanto, es razonable inferir que los compuestos de N permanezcan ligados a las estructuras orgánicas de las fibras después del tratamiento.

Aunque las fibras tratadas retienen una cantidad significativa de N, este nivel sigue siendo insuficiente para ser considerados fertilizantes principales. Sin embargo, la presencia de N en las fibras sugiere que podrían ser útiles como una fuente complementaria de este nutriente en aplicaciones agrícolas. Es importante tener en cuenta que estas fibras tratadas, aunque no son adecuadas como fertilizantes por sí solas, pueden desempeñar un papel en otras aplicaciones agrícolas, como la mejora de la estructura del suelo y la aportación de materia orgánica.

4.4 Efecto de las fibras tratadas en la biodegradabilidad y estabilidad dimensional de compuestos HDPE-Fibra

El estudio de la biodegradabilidad de las fibras naturales es esencial para avanzar hacia una economía circular y minimizar el impacto ambiental de los materiales compuestos. Ya que es fundamental evaluar su comportamiento en condiciones ambientales específicas, como en la exposición en suelos de fibras y compuestos HDPE-fibra, como en la estabilidad dimensional de los compuestos HDPE-fibra. Es entonces que se presentan los resultados de los análisis previos requeridos en la norma de este estudio, tales como: pH del suelo, humedad del suelo y temperatura del ambiente.

Determinación del pH del suelo:

Tabla 8. Valores de pH en muestras de suelo.

Número de Muestra	Lugar	Valor de pH
1	Azogues, parroquia Guapán, barrio la Calera.	8.058
2	Azogues, parroquia Guapán, Guindilig.	8.354
3	Huerto de la universidad de Cuenca, campus Yanuncay	8.008
4	Invernadero de la universidad de Cuenca, campus Yanuncay	7.517
5	Huerto de la universidad de Cuenca, campus Balzay	8.143
6	Parroquia Nulti 1, Cuenca, Azuay	8.113
7	Parroquia Nulti 2, Cuenca, Azuay	7.488
8	Parroquia Nulti 3, Cuenca, Azuay	7.849

Al comparar todos los valores presentados en la Tabla 7, el valor escogido es el de la muestra “Parroquia Nulti 2, Cuenca” teniendo un pH de 7.488, un valor que a comparación de los demás valores es muy cercano a la neutralidad, lo cual es crucial para determinar su influencia en la actividad microbiológica en el ensayo de biodegradabilidad. Ya que este ensayo exige una buena actividad microbiana para que los microorganismos descomponedores de materia orgánica se puedan desarrollar de excelente manera. Además, la norma NTE INEN 2642:2012, exige que el pH del suelo elegido esté en un rango entre 6 y 8, ya que en una muestra de suelo con un pH superior a 8 se puede retener más del CO₂ desprendido por los microorganismos que un suelo neutro y el suelo que tenga un pH menor a 6 puede tener una población microbiana atípica.

Determinación de la humedad de la muestra de suelo escogida:

El ensayo de humedad se realizó por duplicado para la muestra de suelo seleccionada anteriormente. Los resultados se exponen en la tabla 8.

Fórmula:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{188.9194 - 179.7751}{179.7751} * 100 = 5.0865\%$$

Datos obtenidos:

Tabla 9. Pesos obtenidos para el cálculo de la humedad.

Datos	Peso en gramos
Peso húmedo 1	188.91
Peso seco 1	179.77
Peso húmedo 2	137.03
Peso seco 2	127.48

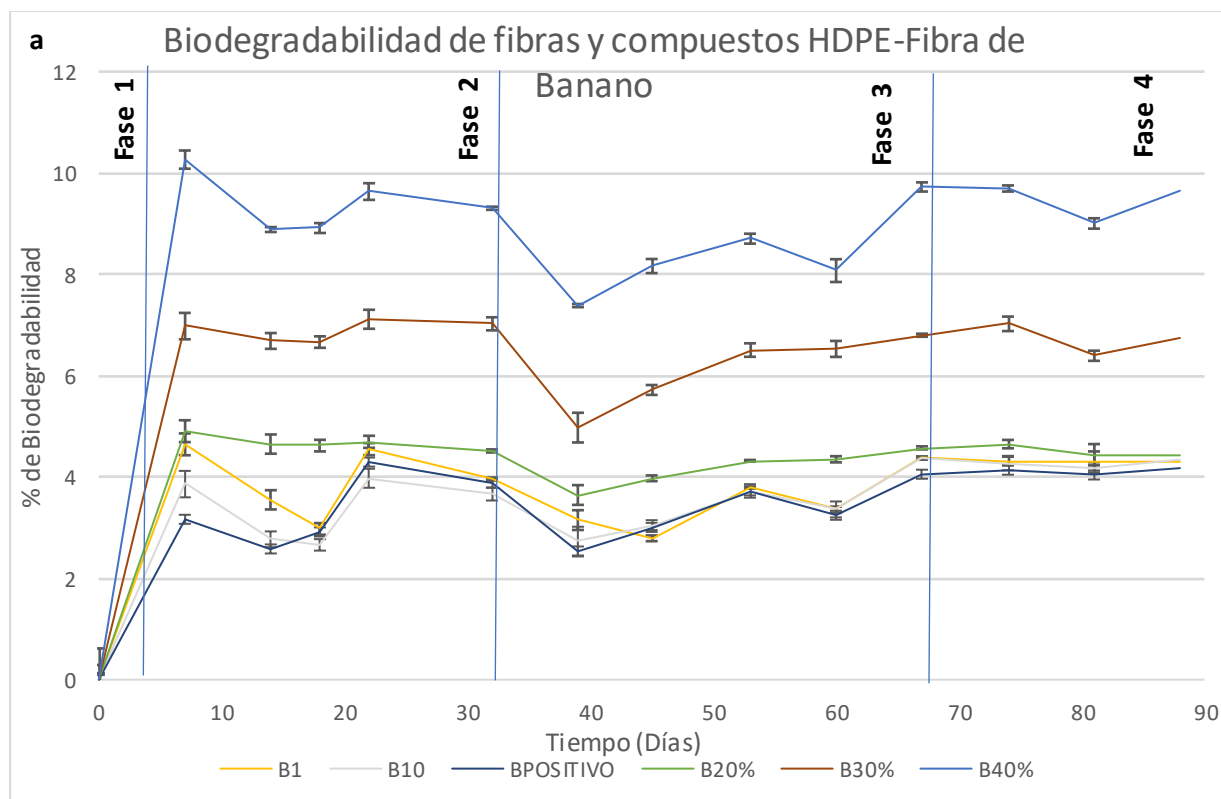
Tabla 10. Porcentaje de humedad de la muestra de suelo seleccionada.

Datos	Porcentaje de humedad
Humedad 1	5.1%
Humedad 2	7.5%
Promedio	6.3 %

El análisis de humedad inicial de la muestra de suelo seleccionada arrojó un valor de 6,3% de humedad (Tabla 9), un contenido muy bajo que podría afectar la actividad microbiana, ya que los microorganismos requieren una cantidad adecuada de agua para sus actividades metabólicas en el suelo. Diversos estudios han subrayado la importancia de mantener niveles adecuados de humedad en el suelo para optimizar la biodegradación en ensayos de laboratorio. Arcos-Hernandez (2012), trabajó con un contenido de humedad en el suelo del 65%, observando que este nivel promovió una biodegradación superior en comparación con condiciones de menor humedad. De manera similar, Gómez y Michel (2013) utilizó un contenido de humedad del 60%, lo cual también favoreció altos niveles de biodegradación en su estudio, destacando la relevancia de una humedad suficiente para mantener activa la microbiota del suelo. Avella et al. (2000), quien empleó un nivel de humedad del 21%, obtuvo menores porcentajes de biodegradación evidenciando que humedades bajas limitan la

actividad microbiana y, en consecuencia, ralentizan el proceso de biodegradación. A partir de los estudios analizados y de los resultados iniciales obtenidos en este estudio, se corrigió la humedad del suelo al 50% mediante la adición de agua destilada, asegurando así las condiciones óptimas para la actividad microbiana y la biodegradación aeróbica.

Biodegradabilidad de las fibras y los compuestos HDPE-Fibra.



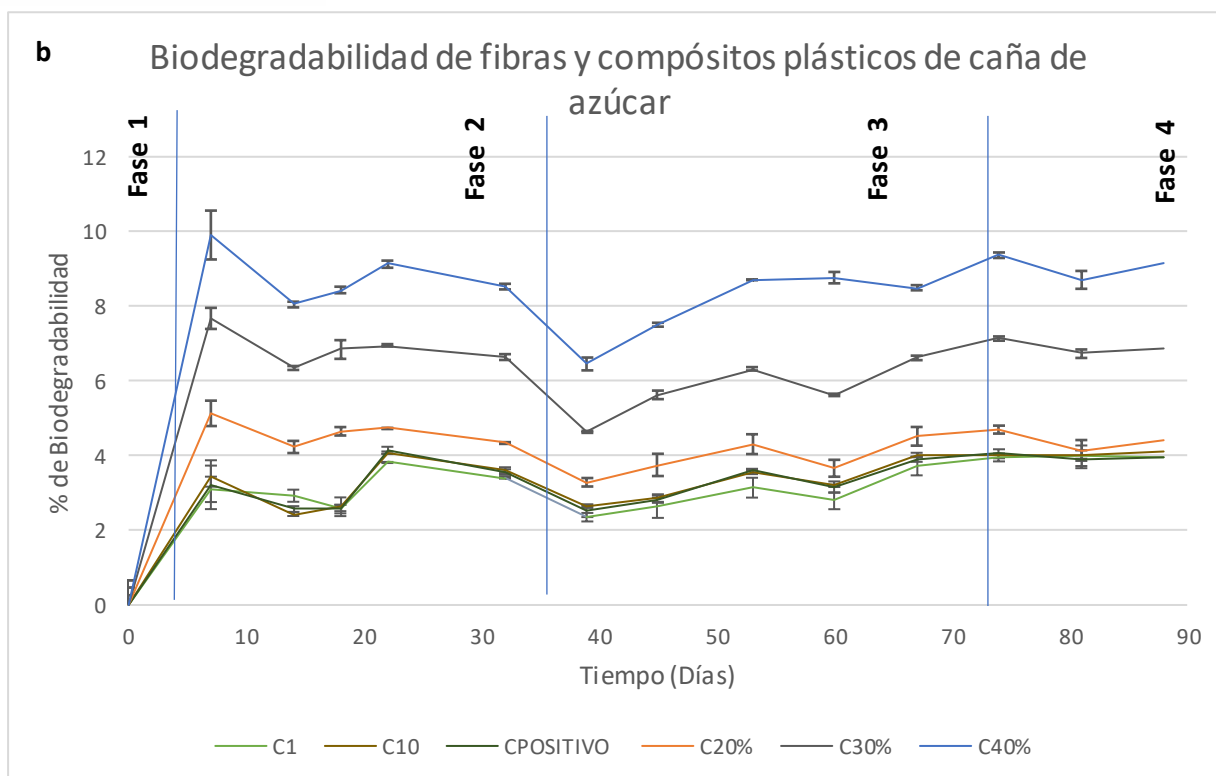


Figura 23. Curvas de biodegradabilidad: (a) fibras y compuestos HDPE-fibra de hoja de banano (b) fibras y compuestos HDPE-Fibra de hoja de caña.

En las curvas de biodegradabilidad presentadas en la Figura 17 a y b, se observan las etapas de la biodegradabilidad de cada fibra, existiendo así 4 fases. La primera es la fase de latencia donde al inicio, la mayoría de curvas muestran una fase donde hay poca o ninguna degradación, esto es debido al tiempo que tardan los microorganismos en colonizar las fibras, produciendo la descomposición. Siendo la del B1 la que ha tenido más tiempo en comenzar a descomponer el material. La segunda etapa es la fase de descomposición activa, viene después de la fase de latencia, la curva sube de manera más pronunciada, aquí los microorganismos están metabolizando las fibras de manera eficiente, y se observa una rápida disminución en la masa de las fibras o un aumento en la producción de CO_2 . Como tercero vemos la fase de descomposición lenta, a medida que pasa el tiempo, la tasa de degradación disminuye, existiendo esos picos que se pueden observar en las figuras 17, esto ocurre cuando los componentes más fácilmente degradables ya han sido descompuestos y quedan materiales más resistentes. Y por último se espera una fase de estabilización, en donde se quiere que la curva alcance una fase de estabilización donde el porcentaje de degradación se nivela. En este punto, la mayor parte del material degradable ha sido descompuesto, y el suelo contiene principalmente productos finales de la degradación y materiales resistentes.

Las curvas de biodegradabilidad microbiana de las fibras de hojas de banano y de caña, respectivamente, con tiempos de residencia de 1 segundo y 10 minutos en el equipo de EV son evaluadas mediante la liberación de CO₂. En ambas se observa una fase inicial de latencia, donde la biodegradación microbiana es mínima debido a la lenta colonización de los microorganismos. Las fibras de hoja de banano (*Musa paradisiaca*) (B1 y B10) muestran una baja liberación de CO₂, alcanzando hasta un 4% tras 90 días. De manera similar, las fibras de hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) (C1 y C10) exhiben una liberación de CO₂ ligeramente mayor alcanzando hasta un 5%, lo que indica una biodegradación limitada en ambos tipos de fibra, esto se debe a que la presencia de la lignina en las fibras lignocelulósicas limita la biodegradación microbiana ya que es un componente que dificulta la descomposición biológica. Roohi et al. (2017), explica que la resistencia de la lignina a la degradación microbiana se debe a su estructura química compleja, que incluye enlaces fenólicos altamente resistentes y una disposición tridimensional que impide el acceso de los microorganismos a los componentes más degradables, como la celulosa y la hemicelulosa. Grgas et al. (2023), expone que esta resistencia se debe principalmente a la abundancia de enlaces β-O-4 aril éter y C-C, extremadamente estables y difíciles de romper. Estos enlaces forman una barrera física y química que protege los polímeros dentro de la estructura lignocelulósica. Además, la lignina es rica en grupos funcionales como fenol hidroxilo y metoxilo, que aumentan su resistencia a la degradación. Aunque ciertos microorganismos, como los hongos de podredumbre blanca y algunas bacterias actinomicetos, poseen enzimas especializadas (como lignina peroxidasa, manganeso peroxidasa y lacasas) capaces de degradar la lignina, estos organismos no son comunes en todos los ambientes, lo que contribuye a la lenta biodegradación de materiales ricos en lignina.

Además de la composición de la fibra, Pinchao-Pinchao et al. (2019) expone que existen otros factores externos desempeñan un papel crucial en la tasa de biodegradación. Las condiciones ambientales como la temperatura, la humedad, el pH y el suministro de oxígeno determinan la actividad microbiana. Si las condiciones de prueba no son óptimas, por ejemplo, si la temperatura es demasiado baja o el ambiente es demasiado seco, la actividad de los microorganismos puede verse gravemente comprometida, lo que resulta en una degradación mínima. Además, los inhibidores naturales de las fibras, como algunos compuestos fenólicos, inhiben la actividad de los microorganismos, creando un ambiente menos favorable para la biodegradación. Chattopadhyay et al. (2011), expone que el máximo porcentaje de biodegradación de estas fibras se encuentra en un rango de 5% al 10%, con una duración del test de 90 días. Esto apoya aún más los estudios reportados que indican que las fibras naturales sin tratar son más resistentes al ataque microbiano debido a su mayor contenido

de lignina y hemicelulosa en comparación con las fibras tratadas. La lignina, en particular, actúa como un agente de adhesión dentro de la estructura del tejido vegetal.

A su vez, en la Figura 17 a) se presentan las curvas de biodegradabilidad microbiana de los compuestos HDPE-fibra de hoja de banano (*Musa Paradisiaca*), mientras que la Figura 17 b) muestra las de los compuestos HDPE-fibra de hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Los resultados indican que ambos tipos de compuestos tienen valores de biodegradación con porcentajes inferiores al 10%. Donde el compuesto HDPE-fibra con 40% de relleno de fibra de hoja de banano y hoja de caña de azúcar tiene un porcentaje de biodegradación del 10%, el compuesto HDPE-fibra con 30% de relleno tiene un 7% de biodegradación y el compuesto HDPE-fibra con 20% de relleno tiene un 5% de biodegradación. Esto indica que la biodegradabilidad de los compuestos HDPE-fibra hasta 90 días aumenta conforme aumenta la proporción de fibra de hoja de caña de azúcar y hojas de banano en el compuesto polimérico. También, la matriz de HDPE reduce considerablemente la capacidad de las fibras para biodegradarse de manera microbiana, debido a su resistencia natural frente a la acción de los microorganismos. Luthra et al. (2020), expone que los rellenos naturales actúan como alimento para el crecimiento de los microorganismos. Donde un alto contenido de relleno natural conduce a una aceleración de la biodegradación debido a su propensión a absorber agua, se generan grietas en la superficie del polímero, lo que facilita el ataque de microorganismos. Xanthopoulou et al. (2023) expone que el HDPE es un polímero altamente cristalino e hidrofóbico, lo que le otorga una alta resistencia a la degradación microbiana. Su estructura lineal de cadenas de carbono dificulta la penetración de los microorganismos, lo que impide que accedan a las fibras incrustadas en la matriz polimérica. Los estudios han mostrado que los polímeros como el HDPE necesitan modificaciones (como pretratamientos térmicos o químicos) para debilitar su estructura y permitir la biodegradación microbiana. Sin estos pretratamientos, el HDPE actúa como una barrera, reduciendo drásticamente la biodegradabilidad de las fibras. Tazi et al. (2014), expone que compuestos HDPE-fibra con un mayor porcentaje de relleno tiene una mayor tasa de biodegradación con un porcentaje de 3% en materiales compuestos que tienen valores similares a los expuestos en esta investigación. A su vez, expone que una cantidad óptima de contenido de fibra podría comprometer el efecto de la biodegradación y las propiedades de los materiales compuestos.

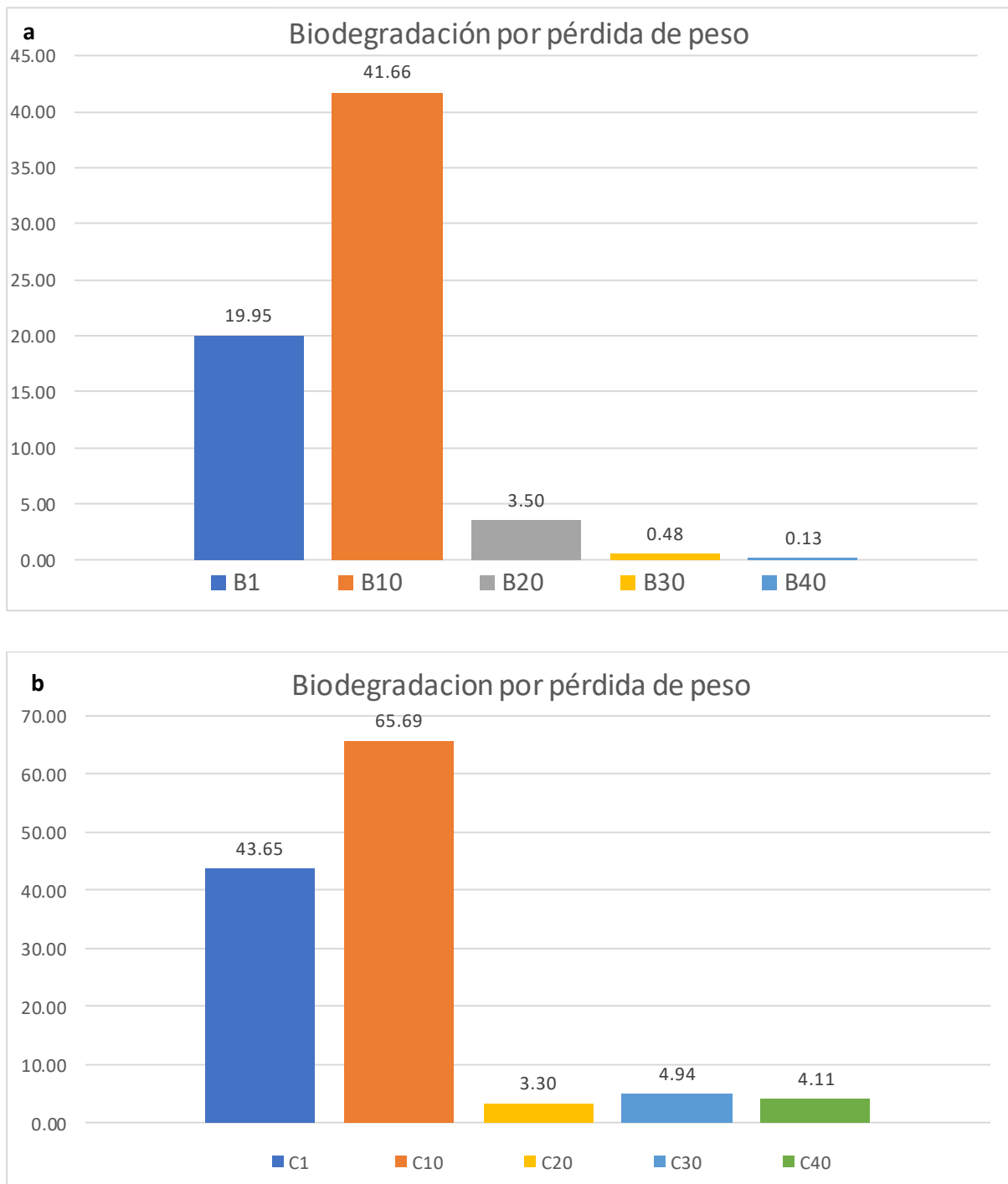


Figura 24. Representación gráfica del porcentaje de pérdida durante exposición al suelo: (a) Hoja de banano, Fibras de banano y compuestos HDPE-Fibra de hoja de banano (b) Hoja de caña, fibras de caña y compuestos HDPE-Fibra de hoja de caña.

En cuanto al porcentaje de pérdida de peso, representado en las Figuras 18 a) y 18 b), las fibras de hoja de banano B1 y B10 pierden el 19.95% y 41.66% de su peso, respectivamente, mientras que las fibras de hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) C1 y C10 pierden el 43.65% y 65.68%. Esto indica que las fibras de hoja de caña de azúcar (*Saccharum*

officinarum) son más susceptibles a la fragmentación y pérdida de masa en el suelo en comparación con las fibras de hoja de banano (*Musa Paradisiaca*). La fragmentación física implica la ruptura del material en fragmentos más pequeños sin cambios químicos significativos en la estructura molecular. Es decir, el material se desintegra sin ser completamente descompuesto por microorganismos, lo cual puede deberse a factores abióticos como la acción mecánica, la exposición a la luz o la oxidación, que debilitan la estructura sin generar CO₂, ya que no involucran la acción microbiana directa (Menofy y Khattab, 2022). Las fibras de hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) con mayor tiempo de residencia (C10) experimentan una mayor pérdida de peso en comparación con C1. Sin embargo, las fibras de hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) son, en general, más biodegradables que las fibras de hoja de banano (*Musa Paradisiaca*), lo que podría estar relacionado con la composición intrínseca de la fibra de hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), posiblemente con menor contenido de lignina o mayor accesibilidad a la acción microbiana tras el tratamiento. Al observar las gráficas de porcentaje de pérdida de peso, mostradas en las Figuras 18 a) y 18 b), se ve que los compuestos HDPE-fibra de hoja de banano (*Musa Paradisiaca*) y compuestos HDPE-fibra de hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), tienen pérdidas de peso significativamente menores en comparación con las fibras puras. Los compuestos con fibra de hoja de banano (*Musa Paradisiaca*) pierden entre el 0.12 % y el 3.50 % de su peso, mientras que los compuestos con fibra de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) pierden entre el 3.29 % y el 4.93 %. Aunque los compuestos con caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) presentan una mayor pérdida de peso en comparación con los de banano (*Musa Paradisiaca*), los valores son bajos, lo que confirma que el HDPE actúa como una barrera que protege a las fibras tanto de la degradación física como microbiana. El HDPE no solo limita la biodegradación microbiana, sino que también ofrece protección física a las fibras encapsuladas. Al ser un material altamente resistente al desgaste y la erosión, el HDPE impide que las fibras entren en contacto directo con factores ambientales como el agua, la luz solar y el oxígeno, los cuales podrían acelerar su degradación. Esta protección física contribuye a la baja pérdida de peso y a la reducida liberación de CO₂ observada en los compuestos HDPE-fibra. Pathak y Navneet, (2017), expone que otra explicación para la mínima pérdida de peso podría ser la formación de una capa protectora en la superficie de la fibra durante la prueba, como una biopelícula o una capa de compuestos resistentes, que limita el acceso microbiano al material subyacente, esta capa protectora ralentiza la degradación al evitar que las enzimas y otros degradantes entren en la fibra.

Estabilidad dimensional y absorción de agua en compuestos HDPE-Fibra

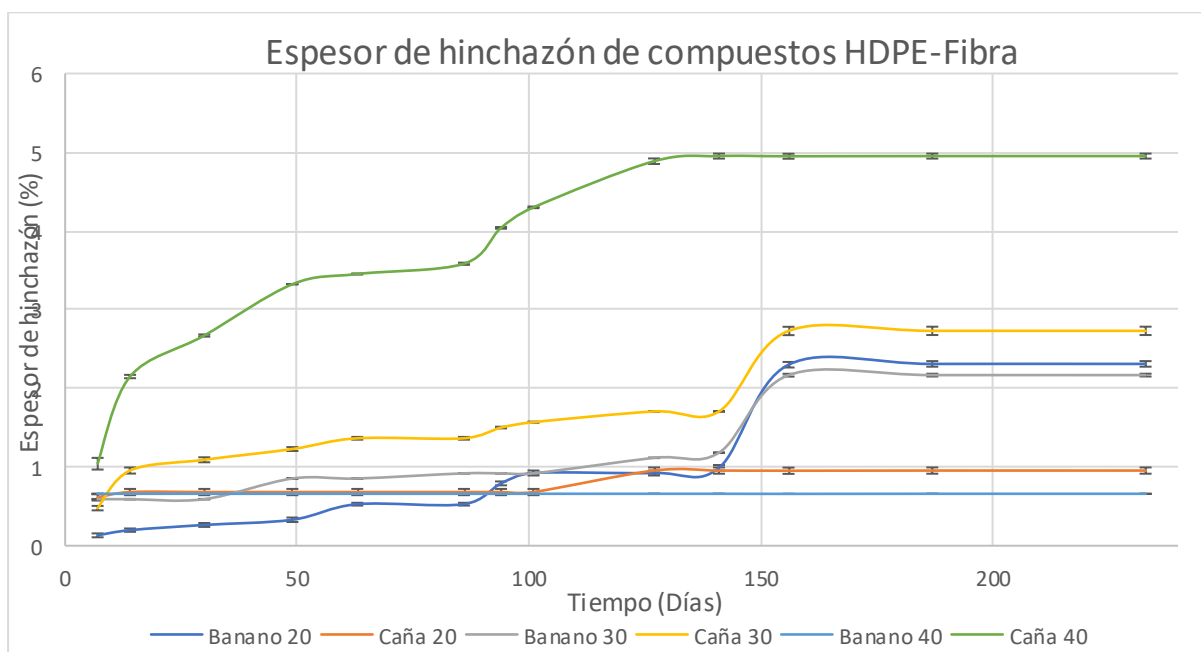
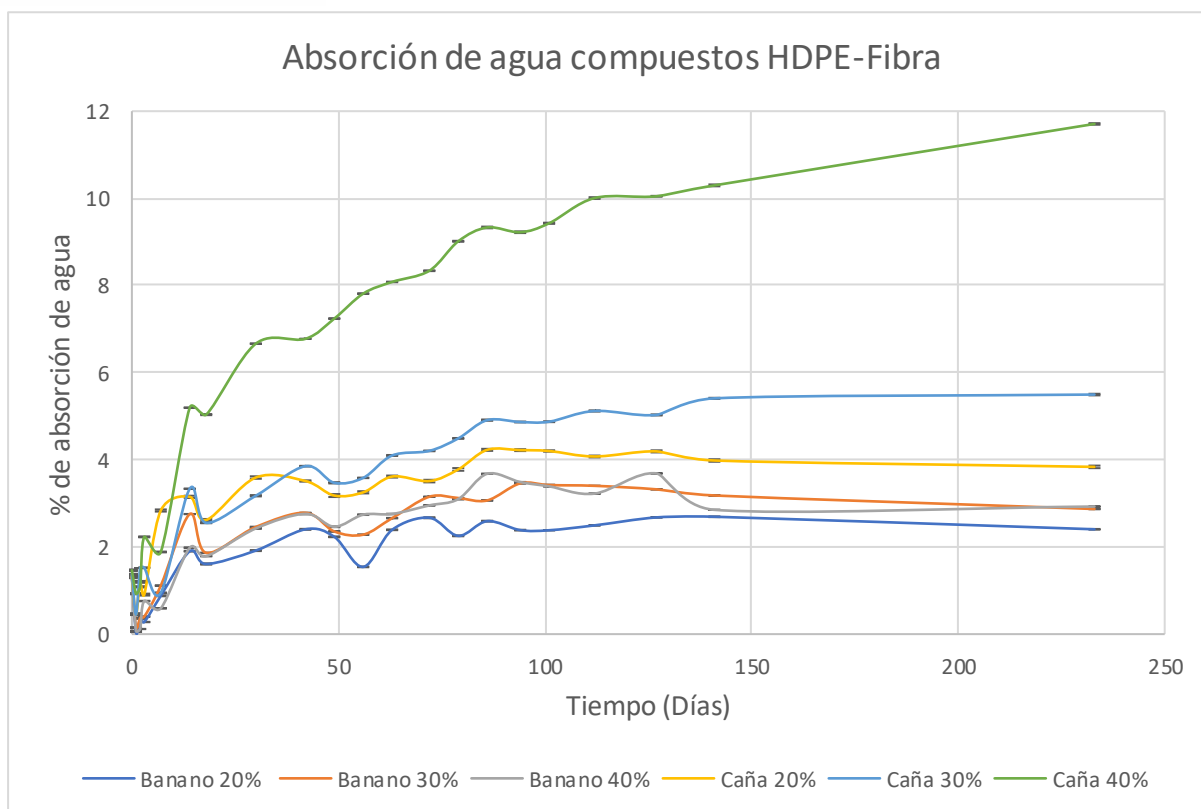


Figura 25. Propiedades de HDPE-Fibra: (a) Absorción de agua y (b) Espesor de hinchazón.

La figura 19 a), nos muestra la absorción de agua en los compuestos poliméricos reforzados con fibrado de hoja de banano (*MusaParadisiaca*) y fibrado de hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en distintas concentraciones a lo largo de un tiempo de inmersión en días. Es entonces que, a lo largo del tiempo de inmersión, el compuesto HDPE-fibra que contiene 40%

de fibras de hojas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), muestra una tendencia clara de mayor porcentaje de inmersión de agua, alcanzando un 12% de absorción después de 200 días. Esto nos indica que, a mayor concentración de fibras de hojas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), aumenta la absorción en agua, en cambio los compuestos con 20% y 30% de caña muestran un comportamiento mucho más estable y casi constante en términos de absorción, teniendo porcentajes de 4% y 5% respectivamente, indicando que estas concentraciones mantienen mejor la integridad estructural frente al agua. A su vez los compuestos con fibras de hoja de banano (*Musa Paradisiaca*), tanto la de 20%, 30% y 40%, ofrecen una mayor resistencia a la absorción de agua teniendo un rango de absorción de 4%, significando en una mejor cohesión entre la matriz polimérica HDPE y las fibras. George et al. (1998), investigaron la relación entre la absorción de humedad de los compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de hojas de piña y las cargas de fibra (10%, 20% y 30% en peso), coincidiendo con los resultados expuestos. Es entonces que la absorción de agua en la matriz monomérica se produce principalmente debido a la naturaleza hidrofílica de los grupos funcionales presentes en la estructura polimérica. Este proceso es crítico, ya que la penetración de moléculas de agua en la matriz provoca un distanciamiento entre las cadenas poliméricas, lo que lleva a la expansión de la red polimérica y, en algunos casos, a la formación de microfisuras. Además, la absorción de agua puede facilitar la degradación hidrolítica de los enlaces químicos dentro de la matriz, acelerando la pérdida de integridad estructural. En aplicaciones donde los materiales están expuestos a condiciones húmedas o acuosas, este proceso puede ser particularmente problemático, reduciendo la vida útil del material y afectando su rendimiento general. Por tanto, es esencial controlar y minimizar la absorción de agua para mantener las propiedades deseadas en materiales compuestos y polímeros. Según estudios Calampa Torres (2000) y Palaniyappan (2016), las hojas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) tienen un mayor contenido de hemicelulosa en comparación con la de banano (*Musa Paradisiaca*), siendo la hemicelulosa más propensa a la absorción de agua debido a su estructura química menos ordenada y más accesible a moléculas de agua. Esto aumenta la capacidad del compuesto polimérico con fibra de hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) para absorber y retener agua en comparación con la de hoja de banano (*Musa Paradisiaca*), que tiene una menor cantidad de hemicelulosa.

Como compuestos con fibra de caña al 40% presentan el mayor espesor de hinchazón, alcanzando casi el 6% después de 250 días de inmersión. Stark (2001) encontró que los compuestos de matriz polimérica y fibra con un volumen del 20% en peso alcanzaron el equilibrio después de 1500 h en un baño de agua y absorbieron solo un 1,4% de humedad, mientras que los compuestos con una carga del 40% en peso alcanzaron el equilibrio después de 1200 h de inmersión en agua y absorbieron aproximadamente un 9% de humedad,

coincidiendo con los resultados antes presentados. Palaniyappan, (2016) sugiere que la caña, al tener una buena proporción de celulosa y grupos hidrofílicos, absorbe más agua, lo que provoca un aumento significativo en el hinchamiento. Los compuestos con fibra de hoja de banano (*Musa Paradisiaca*), independientemente de la concentración, muestran un menor porcentaje de hinchamiento en comparación con la fibra de hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). El compuesto de banano al 40% es el que menos hincha, con un porcentaje de hinchamiento que apenas supera el 1%. Esto sugiere que las fibras de hoja de banano (*Musa Paradisiaca*) tienen una menor capacidad de absorción de agua que las fibras de la hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Tanto en los compuestos de 20% y 30% de HDPE-Fibra de hojas de banano (*Musa Paradisiaca*) como en los compuestos 20% y 30% de HDPE-Fibra de hojas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), se observa una disminución considerable en comparación con la caña 40%, lo que indica que la concentración de fibra y el tipo de fibra que tiene el compuesto, tienen un impacto directo en el comportamiento de los mismo en ambientes húmedos. A su vez, Rudá et al. (2024) explica que, en todos los compuestos, el hinchamiento en espesor tiende a estabilizarse después de aproximadamente 150 días de inmersión, lo que significa que, aunque las fibras siguen absorbiendo agua durante este periodo, alcanzan un equilibrio de saturación. El hinchamiento en espesor está directamente relacionado con la naturaleza hidrofílica de las fibras naturales. Las fibras de hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) presentan una mayor absorción de agua, lo que provoca un hinchamiento más significativo, mientras que las fibras de hoja de banano (*Musa Paradisiaca*) tienden a absorber menos agua, lo que resulta en un menor hinchamiento.

Usos Potenciales

En la industria de la construcción, se busca utilizar materiales con baja absorción de agua para evitar problemas como la hinchazón y la deformación. Generalmente, los materiales destinados a estas aplicaciones deben tener una absorción de agua inferior al 5% (Bui et al., 2020). Comparando estos valores con los compuestos HDPE-fibra de hojas de banano (*Musa Paradisiaca*), que muestran una absorción de agua menor al 4% y un espesor de hinchazón reducido, estos cumplen con los requisitos industriales, haciéndolos aptos para aplicaciones como paneles o ladrillos en ambientes húmedos. Otra posible aplicación para estos compuestos es en la fabricación de muebles para exteriores. En este contexto, es crucial que los materiales resistan la exposición prolongada a las condiciones climáticas adversas. La industria prefiere una absorción de agua por debajo del 6% para asegurar la durabilidad (Bui et al., 2020). Los compuestos HDPE-fibra de hoja de banano (*Musa Paradisiaca*), con valores de absorción inferiores al 4%, son más adecuados para estas aplicaciones debido a su baja

retención de humedad, lo que reduce el riesgo de deterioro por humedad. Por otro lado, los compuestos HDPE-fibra de hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), que tienen una absorción de agua del 12%, superan este rango por lo que podrían requerir tratamientos protectores adicionales para ser utilizados en estas aplicaciones. Sin embargo, los compuestos que contienen una menor proporción de fibra, alrededor del 20%, podrían ser más adecuados para este uso debido a su menor porcentaje de absorción en comparación con proporciones mayores. No obstante, esto podría afectar sus propiedades mecánicas, ya que se ha demostrado que un mayor contenido de fibra en los compuestos de HDPE generalmente mejora las propiedades mecánicas, pero también aumenta la absorción de agua (Neher et al., 2020). En aplicaciones geotextiles, como el control de la erosión, los materiales con una capacidad de absorción de agua significativa pueden ser muy beneficiosos. Los compuestos HDPE-fibra de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), que tienen una absorción de agua en torno al 12% y se encuentran en proporciones del 30% al 40%, resultan ventajosos para la estabilización del suelo y la promoción del crecimiento vegetal, ya que permiten una mejor retención de humedad y una interacción más efectiva con el suelo. (Nguyen y Indraratna, 2023).

Posibles usos agrícolas

En un futuro, para una gestión sostenible, se prevé que las fibras tratadas mediante el proceso de EV tendrán varios usos en el sector agrícola, ofreciendo soluciones sostenibles y eficientes. Su utilización contribuirá a una agricultura más ecológica, al integrarse en procesos que fomentarán la reducción de desechos, la conservación de recursos y la mejora del suelo, todo esto con un impacto ambiental considerablemente menor en comparación con los productos convencionales. Basándonos en los resultados que se obtuvieron, las fibras no serán una alternativa apropiada para el uso como fertilizante. Sin embargo, se prevé que las fibras podrán ser utilizadas para crear mantas de acolchado biodegradable. Estas mantas se colocarán sobre el suelo para suprimir el crecimiento de malezas, retener la humedad y proteger los cultivos. A diferencia de los plásticos convencionales, estas mantas se biodegradarán con el tiempo, eliminando la necesidad de retirarlas después de la cosecha y minimizando la generación de residuos. Además, estas fibras serán empleadas en la fabricación de telas o mallas para invernaderos y coberturas agrícolas, que servirán para proteger los cultivos de plagas, excesos de sol o viento, mientras se biodegradarán sin dejar residuos permanentes en el entorno agrícola.

4.5 Contenido nutricional y fitotoxicidad de los subproductos líquidos

- Contenido de N, P, y K en subproductos líquidos

Tabla 11. Resultados obtenidos de pH, nitrógeno, fósforo y potasio en subproductos líquidos de la extracción de fibras de hojas de caña y banano mediante explosión con vapor.

Tipo de líquido	pH	N (ppm)	P (pmm)	K (ppm)
B1	4.763	0.00	0.219	0.659
B10	4.645	0.00	0.108	0.680
C1	4.170	0.00	0.103	0.360
C10	4.419	0.00	0.146	0.440

El pH ligeramente ácido, entre 4.170 y 4.763, es consistente con la presencia de ácidos orgánicos formados durante el tratamiento, lo que podría ser beneficioso en suelos alcalinos (Chukwu et al., 2012), pero no es suficiente para compensar las deficiencias nutricionales que presentan estos líquidos. La ausencia de N detectable es una limitación crítica, ya que el N es un macronutriente esencial para el crecimiento vegetal. Sin una fuente de N, estos subproductos no podrían sostener el desarrollo de las plantas por sí solos (Xing et al., 2021). El contenido de P es también muy bajo, con concentraciones que van de 0.103 ppm a 0.219 ppm. Dado que el P es crucial para el desarrollo radicular y la formación de semillas, teniendo en cultivos una concentración total de 0.1 a 0.5% (Xing et al., 2021), la baja presencia de este nutriente en los subproductos líquidos indica que no serían una fuente significativa de P para las plantas. El K es vital para varias funciones fisiológicas en las plantas, como la regulación osmótica y la activación de enzimas. Sin embargo, aunque las cantidades de K presentadas en la tabla 12, son más significativas, siguen siendo insuficientes para reemplazar un fertilizante convencional, ya que debería cumplir un mínimo de 3% como nos expone Agrocalidad (2022). Aunque los subproductos líquidos presentan una mayor concentración de K, un macronutriente esencial, su bajo contenido de N y P, sumado a su naturaleza ácida, restringe su eficacia como fertilizantes completos (Egbujuo et al., 2018). Por lo tanto, es poco probable que estos líquidos sean efectivos como fertilizantes primarios sin una suplementación adicional de macronutrientes esenciales.

- Fitotoxicidad de los subproductos líquidos

La figura 20 presenta resultados del IG en dicotiledóneas y monocotiledóneas expuestas a líquidos de EV de hojas de caña y banano:

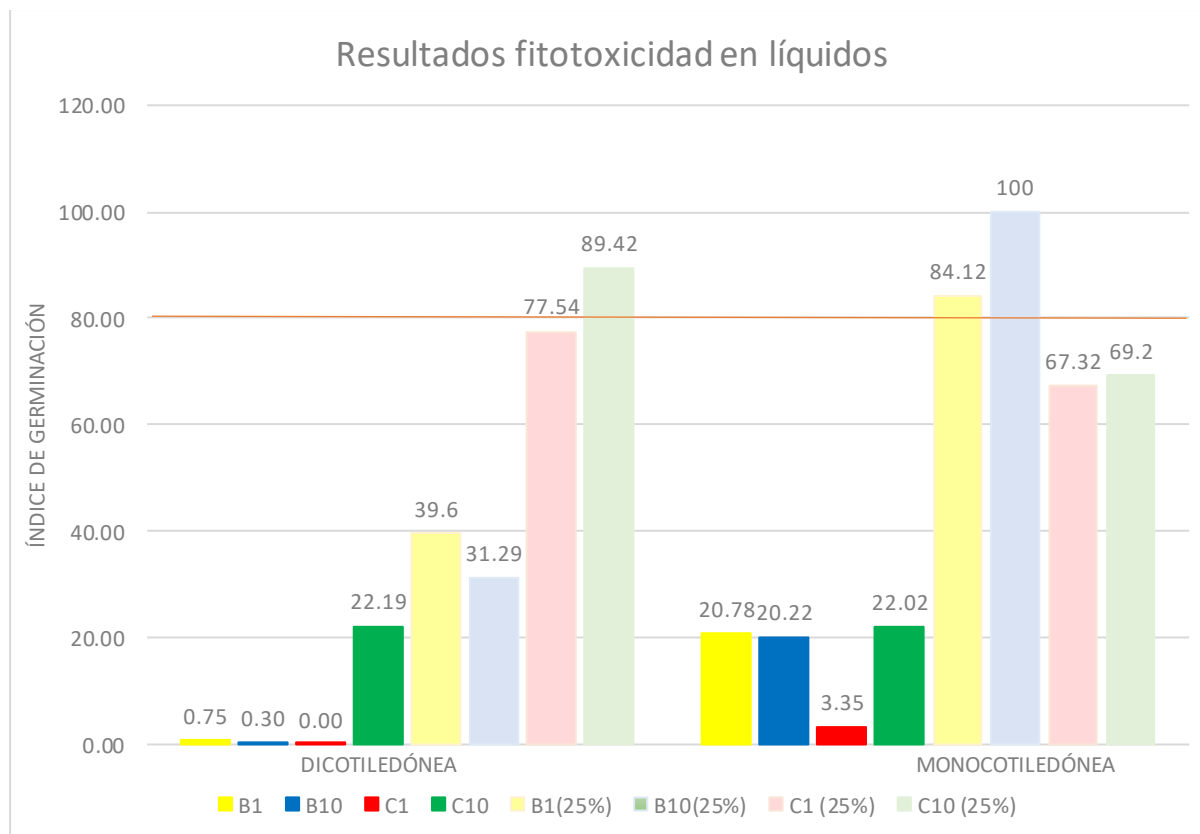


Figura 26. Resultados de fitotoxicidad en los líquidos.

La figura 20 muestra los resultados del análisis de fitotoxicidad en líquidos residuales obtenidos como subproductos del proceso de extracción de fibras de hojas de caña y banano mediante la técnica de EV, con variaciones en los tiempos de residencia (1 segundo y 10 minutos). Se evaluó el impacto de estos líquidos, tanto concentrados como diluidos al 25%, en el IG de dos tipos de semillas: lenteja (dicotiledónea) y trigo (monocotiledónea). Los tratamientos incluyen:

B1 y B10: Líquidos de EV de hojas de banano (*Musa Paradisiaca*) con tiempos de residencia de 1 segundo y 10 minutos, respectivamente.

C1 y C10: Líquidos de EV de hojas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) con tiempos de residencia de 1 segundo y 10 minutos, respectivamente.

La línea naranja en la Figura 20, indica el umbral del 80% de IG, debajo del cual se considera que los líquidos presentan fitotoxicidad. Se utilizaron dos tipos de semillas: lenteja (dicotiledónea) y trigo (monocotiledónea). El uso de una monocotiledónea y una dicotiledónea permite evaluar cómo diferentes tipos de plantas responden a los subproductos, lo que nos genera una perspectiva integral del potencial fitotóxico de los mismos. Los resultados indican que los líquidos obtenidos a partir del proceso de EV tienen un alto potencial fitotóxico, lo que sugiere que podrían ser utilizados como herbicidas. Todos los líquidos analizados muestran un IG por debajo del 80%, lo que evidencia un efecto inhibitorio significativo sobre la germinación y el crecimiento radicular de las semillas, en comparación con un control. La fitotoxicidad de estos líquidos se debe a la presencia de compuestos liberados durante el tratamiento, como derivados de lignina (ácidos fenólicos y aldehídos) y ácidos orgánicos (ácido acético, ácido fórmico y ácido levulínico) (Auxenfans et al., 2017). Estos compuestos interfieren con procesos críticos en las plantas, como la absorción de agua y nutrientes, la síntesis de ADN y proteínas, y el metabolismo de auxinas, lo que afecta negativamente la germinación y el desarrollo inicial de las plantas (Jacquet et al., 2015; Josefsson et al., 2002). El efecto herbicida es más pronunciado en líquidos obtenidos de tratamientos más intensos, como el líquido de C1 (caña con 1 segundo de residencia), que muestra una mayor fitotoxicidad en monocotiledóneas. Sin embargo, al diluir los líquidos al 25%, se observa una reducción significativa de la fitotoxicidad, especialmente en monocotiledóneas, lo que sugiere que la concentración de compuestos fitotóxicos es determinante para su eficacia. En resumen, debido a su capacidad para inhibir significativamente la germinación y el crecimiento de las semillas, los líquidos obtenidos mediante EV podrían ser utilizados como herbicidas naturales, especialmente en su forma no diluida. Sin embargo, la efectividad puede variar según la especie de planta objetivo y la concentración del líquido utilizado.

- Potencial uso agrícola de los subproductos líquidos

El estudio sobre los líquidos obtenidos al extraer fibras de hojas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y banano (*Musa Paradisiaca*) mostró que estos líquidos pueden ser tóxicos para las plantas, impidiendo el crecimiento de las semillas. Por esta razón, se descartó su uso como fertilizante y se comenzó a investigar su posible uso como herbicidas. Los líquidos demostraron una notable actividad fitotóxica, similar a la observada en ciertas plantas que producen compuestos alelopáticos. Los compuestos alelopáticos son sustancias químicas liberadas por algunas plantas que inhiben el crecimiento de otras, siendo una estrategia natural para la supresión de competencia vegetal. En este contexto, se llevó a cabo un ensayo de fitotoxicidad utilizando semillas de *Taraxacum officinale* (Diente de León), una

planta comúnmente considerada "mala hierba" debido a su rápida proliferación y resistencia, lo cual puede perjudicar a los cultivos deseados.

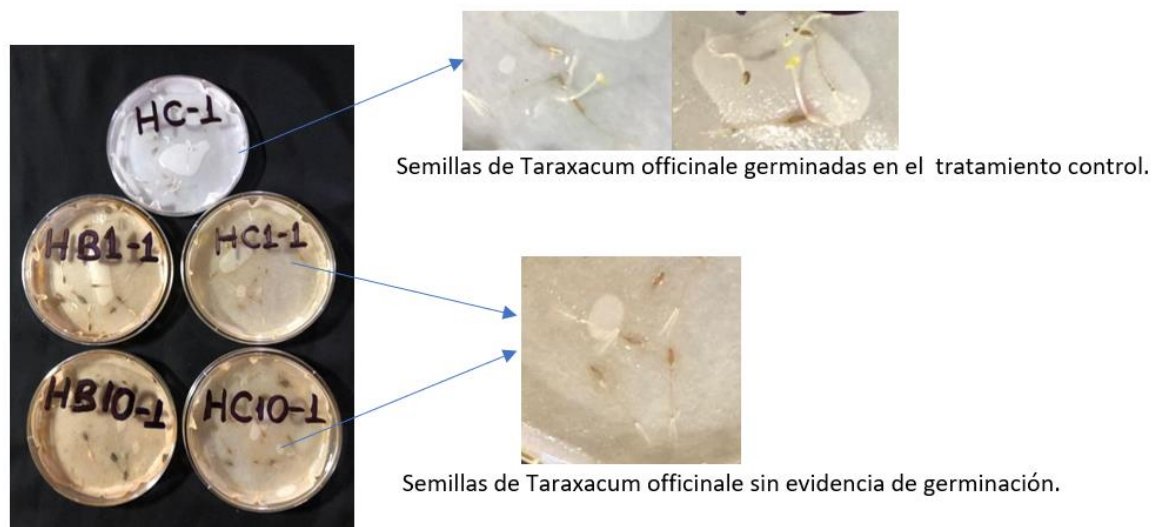


Figura 27. Determinación del efecto herbicida de líquidos residuales del proceso de explosión con vapor en semillas de *Taraxacum officinale*.

Los resultados obtenidos demuestran que las semillas de *Taraxacum officinale* no germinaron (Figura 21) en presencia de los líquidos fitotóxicos, mientras que el control (sin tratamiento) mostró una germinación normal, lo que confirma la efectividad de los líquidos como herbicidas. La fitotoxicidad parece ser causada por compuestos fenólicos y alelopáticos presentes en los líquidos, que interfieren con procesos fisiológicos críticos como la germinación y el crecimiento radicular. Estos resultados indican que los líquidos residuales contienen compuestos fitotóxicos que inhiben significativamente la germinación y el crecimiento de *Taraxacum officinale*. Esta propiedad puede ser utilizada para desarrollar herbicidas biológicos, dado que *Taraxacum officinale* es una planta invasora que compite con cultivos agrícolas y puede afectar el rendimiento de las cosechas. La falta de germinación en las semillas tratadas sugiere un efecto inhibitorio importante, probablemente debido a la presencia de ligninas, ácidos orgánicos y compuestos fenólicos en los líquidos residuales (Wang y Liu, 2010).

5. Conclusiones

El pretratamiento EV es un método eficaz para procesar biomasa residual lignocelulósica proveniente de hojas de banano (*Musa Paradisiaca*) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Este tratamiento facilita la descomposición de la estructura de la biomasa, permitiendo la extracción de entre 5.0 y 7.5 gramos de fibras naturales a partir de 200 gramos de materia prima y la obtención de subproductos líquidos. El proceso logra un rendimiento de entre 2.5% y 4.0%, alcanzando su punto óptimo cuando el tiempo de residencia en el equipo de EV es de 10 minutos.

Las fibras obtenidas mediante EV pueden integrarse en una matriz de HDPE para formar un compuesto plástico-fibra que presente una buena estabilidad dimensional en contacto con el agua. Las fibras de hojas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), con una capacidad de absorción de agua del 12.0%, tienden a absorber más humedad, lo que incrementa su susceptibilidad a la pérdida de estabilidad estructural. Por el contrario, las fibras de hoja de banano (*Musa Paradisiaca*), con un porcentaje de absorción de agua del 3%, presentan una mejor cohesión con la matriz plástica, ofreciendo mayor estabilidad dimensional, lo cual resulta beneficioso para aplicaciones que demandan uso a largo plazo en ambientes de alta humedad. Por otro lado, la presencia de las fibras facilitan la biodegradación del compuesto, alcanzando una biodegradabilidad de entre un 5.0% y un 10.0% en comparación con la matriz polimérica que no es biodegradable por sí sola, ofreciendo una solución más sostenible para aplicaciones que requieren materiales de menor impacto ambiental.

Los subproductos líquidos de EV contienen compuestos de hemicelulosa, celulosa y lignina cuya composición varía según el tiempo y la temperatura del proceso. Estos líquidos presentan valores de porcentajes de N, P y K, entre 0 a 0.680 ppm, presentando un bajo contenido de nutrientes esenciales reduce su idoneidad como fertilizante orgánico. Por otra parte, estos líquidos inhiben la germinación de semillas, con un índice de germinación de 0 a 22.19% (dicotiledóneas) y de 3.35 a 22.02% (monocotiledóneas), probablemente debido a la presencia de compuestos como ácidos fenólicos (pH promedio obtenido de 4.5), lo cual les confiere potencial como herbicidas naturales.

6. Recomendaciones

A partir de los resultados del presente estudio, se recomienda la ampliación del estudio de EV, ajustando las condiciones del proceso, tales como temperatura y el tiempo de residencia, basándose en las propiedades de la biomasa tratada

A su vez, dado el alto potencial fitotóxico de los subproductos líquidos, se recomienda profundizar la investigación más a fondo en las concentraciones óptimas y métodos de aplicación de los subproductos líquidos para su uso eficiente como herbicidas naturales. Además de estudiar su efecto sobre diferentes especies de malezas y cultivos para maximizar su efectividad y minimizar los impactos no deseados en plantas no objetivo.

Finalmente se recomienda, explorar nuevos mercados para las fibras naturales, identificando nuevas oportunidades comerciales y expandir su aplicación en productos que requieren materiales más ecológicos y de alto rendimiento.

7. Referencias

- Abdul-Ameer Ali, W. (2019). Biodegradation and phytotoxicity of crude oil hydrocarbons in an agricultural soil. *Chilean journal of agricultural research*, 79(2), 266-277.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392019000200266>
- Abdullah, N., Sulaiman, F., & Taib, R. M. (2013). Characterization of banana (*Musa* spp.) plantation wastes as a potential renewable energy source. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1528, No. 1, pp. 325-330). American Institute of Physics.
- Adekiya, A. O., Ejue, W. S., Olayanju, A., Dunsin, O., Aboyeji, C. M., Aremu, C., ... & Akinpelu, O. (2020). Different organic manure sources and NPK fertilizer on soil chemical properties, growth, yield and quality of okra. *Scientific Reports*, 10(1), 1-9.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-73291-x>
- Adeniyi, A. G., Ighalo, J. O., & Onifade, D. V. (2019). Banana and plantain fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Polymer Engineering*, 39(7), 597-611.
<https://doi.org/10.1515/polyeng-2019-0085>
- AEFA (Asociación Española de fabricantes de Agronutrientes). (2019). Extracto de algas en la agricultura. Recuperado de: Association of Official Analytical Chemists – AOAC. 1990. Official methods of analysis. 21st Ed. Three volumes. AOA Inc. Arlington, WA, USA.
- Agrocalidad. (2022). Manual para el control de calidad de fertilizantes. Agrocalidad.
<https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2022/06/Manual-fertilizantes-ver7.pdf>

- Al-Maharma, A. Y., Patil, S. P., & Markert, B. (2020). Effects of porosity on the mechanical properties of additively manufactured components: a critical review. *Materials Research Express*, 7(12), 122001. Doi: 10.1088/2053-1591/abcc5d
- Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M., & Negro, M. J. (2010). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology*, 101(13), 4851-4861. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.093>
- Andrade, I. M., & Buitrón, M. G. (2002). Influencia del origen del inóculo en la prueba de biodegradabilidad anaerobia. In XIII Congreso Nacional de la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, Guanajuato.
- Anguita, J. V., Smith, C. T. G., Stute, T., Funke, M., Delkowski, M., & Silva, S. R. P. (2020). Dimensionally and environmentally ultra-stable polymer composites reinforced with carbon fibers. *Nature materials*, 19(3), 317-322. <https://doi.org/10.1038/s41563-019-0565-3>
- Antoniou, N., Monlau, F., Sambusiti, C., Ficara, E., Barakat, A., & Zabaniotou, A. (2019). Contribution to Circular Economy options of mixed agricultural wastes management: Coupling anaerobic digestion with gasification for enhanced energy and material recovery. *Journal of cleaner production*, 209, 505-514. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.055>
- Arcos-Hernandez, M. V., Laycock, B., Pratt, S., Donose, B. C., Nikolić, M. A., Luckman, P., ... & Lant, P. A. (2012). Biodegradation in a soil environment of activated sludge derived polyhydroxyalkanoate (PHBV). *Polymer degradation and stability*, 97(11), 2301-2312. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.07.035>.

- Auxenfans, T., Crônier, D., Chabbert, B., & Paës, G. (2017). Understanding the Structural and Chemical Changes of Plant Biomass Following Steam Explosion Pretreatment. *Biotechnol. Biofuels*, 10, 36. doi:10.1186/s13068-017-0718-z
- Avella, M., Rota, G. L., Martuscelli, E., Raimo, M., Sadocco, P., Elegir, G., & Riva, R. (2000). Poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) and wheat straw fibre composites: thermal, mechanical properties and biodegradation behaviour. *Journal of Materials Science*, 35(4), 829-836. doi:10.1023/A:1004773603516.
- Bagüin, P., & Aubert, J.-P. (1994). The biological degradation of cellulose. *FEMS Microbiology Reviews*, 13(1), 25-58. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.1994.tb00033.x>
- Bailey, K. L. (2014). The bioherbicide approach to weed control using plant pathogens. *Integrated Pest Management Current Concepts and Ecological Perspective*, 13, 245-266. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398529-3.00014-2>
- Ballesteros, I., Ballesteros, M., Cara, C., Sáez, F., Castro, E., Manzanares, P., ... & Oliva, J. M. (2011). Effect of water extraction on sugars recovery from steam exploded olive tree pruning. *Bioresource Technology*, 102(11), 6611-6616. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.077>
- Barbaś, P., Pietraszko, M., Pszczółkowski, P., Skiba, D., & Sawicka, B. (2023). Assessing Phytotoxic Effects of Herbicides and Their Impact on Potato Cultivars in Agricultural and Environmental Contexts. *Agronomy*, 14(1), 85. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010085>
- Beckham, G. T. (Ed.). (2018). *Lignin Valorization: Emerging Approaches*. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781788010351>

- Bhardwaj, A., Alam, T., Sharma, V., Alam, M. S., Hamid, H., & Deshwal, G. K. (2020). Lignocellulosic agricultural biomass as a biodegradable and eco-friendly alternative for polymer-based food packaging. *Journal of Packaging Technology and Research*, 4, 205-216. <https://doi.org/10.1007/s41783-020-00089-7>
- Billah, M. M., Rabbi, M. S., & Hasan, A. (2021). A review on developments in manufacturing process and mechanical properties of natural fiber composites. *Journal of Engineering Advancements*, 2(01), 13-23. Doi: <https://doi.org/10.38032/jea.2021.01.003>
- Bot, A. & Benites, J. (2005) . The importance of soil organic matter. Key to drought-resistant soil and sustained food roduction. *FAO Soils Bulletin* 80.
- Boutin, C. (2020). Herbicides: Non-Target Species Effects. In *Managing Global Resources and Universal Processes* (pp. 33-48). CRC Press.
- Bozym, M. (2020). Assessment of phytotoxicity of leachates from landfilled waste and dust from foundry. *Ecotoxicology*, 29(4), 429-443. <https://doi.org/10.1007/s10646-020-02197-1>
- Brodhagen, M., Peyron, M., Miles, C., & Inglis, D. A. (2015). Biodegradable plastic agricultural mulches and key features of microbial degradation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99, 1039-1056. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12422-17>
- Brownell, H. H., Yu, E. K. C., & Saddler, J. N. (1986). Steam-explosion pretreatment of wood: Effect of chip size, acid, moisture content and pressure drop. *Biotechnology and Bioengineering*, 28(6), 792-801. <https://doi.org/10.1002/bit.260280604>

Bui, H., Sebaibi, N., Boutouil, M., & Levacher, D. (2020). Determination and Review of Physical and Mechanical Properties of Raw and Treated Coconut Fibers for Their Recycling in Construction Materials. *Fibers*, 8(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/fib8060037>

Burgo-Bencomo, O.B., Gaitán-Suazo, V., Yanez-Sarmiento, J., Zambrano-Morales, A.A., Castellanos-Pallerols, G., Estrada-Hernández, J.A., 2019. La Economía circular es una alternativa sostenible para el desarrollo de la agricultura. *Espacios*, 40 (13), 2. <http://www.revistaespacios.com/a19v40n13/a19v40n13p02.pdf>

Calampa Torres, C. D. P. (2000). Evaluación de propiedades físicas y químicas de la fibra obtenida de la hoja de plátano (musa paradisiaca). Repositorio - UNSM. <http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/51>

Chaïb, S., Pistevos, J. C. A., Bertrand, C., & Bonnard, I. (2021). Allelopathy and allelochemicals from microalgae: An innovative source for bio-herbicidal compounds and biocontrol research. *Algal Research*, 54, Article 102213. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102213>

Chakraborty, D., Nagarajan, S., Aggarwal, P., Gupta, V.K., Tomar, R.K., Garg, R.N., Sahoo, R.N., Sarkar, A., Chopra, U.K., Sarma, K.S.S. & Kalra, N. (2008). Effect of mulching on soil and plant water status, and the growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management* . 95: 1323 6 1334. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.06.00>

Chang, V. S., & Holtzapple, M. T. (2000). Fundamental factors affecting biomass enzymatic reactivity. In *Twenty-First Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals: Proceedings of the Twenty-First Symposium on Biotechnology for Fuels and*

Chemicals Held May 2–6, 1999, in Fort Collins, Colorado (pp. 5-37). Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1392-5_1

Chattopadhyay, S. K., Singh, S., Pramanik, N., Niyogi, U. K., Khandal, R. K., Uppaluri, R., & Ghoshal, A. K. (2011). Biodegradability studies on natural fibers reinforced polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 121(4), 2226-2232. <https://doi.org/10.1002/app.33828>

Chattopadhyay, S. K., Singh, S., Pramanik, N., Niyogi, U. K., Khandal, R. K., Uppaluri, R., & Ghoshal, A. K. (2011). Biodegradability studies on natural fibers reinforced polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 121(4), 2226-2232. <https://doi.org/10.1002/app.33828>

Chen, W. H., Tsai, C. C., Lin, C. F., Tsai, P. Y., & Hwang, W. S. (2013). Pilot-scale study on the acid-catalyzed steam explosion of rice straw using a continuous pretreatment system. *Bioresource technology*, 128, 297-304. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.111>

Chornet, ESTEBAN, y Overend, RP (1991). Cinética fenomenológica y aspectos de ingeniería de reacción de tratamientos con vapor/agua. Técnicas de explosión con vapor: fundamentos y aplicaciones industriales. Ámsterdam: Gordon and Breach Science Publishers , 21-58.

Chowdhury, M., Kumar Khura, T., Ahmad Parray, R., Kushwaha, H. L., Upadhyay, P. K., Jha, A., Patra, K., Kushwah, A., & Kumar Prajapati, V. (2024). The use of destructive and nondestructive techniques in concrete nitrogen assessment in plants. *Journal of Plant Nutrition*, 47(14), 2271-2294. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2342353>

Chukwu LI, Ano AO and Asawalam, DO (2012). Effects of Poultry Manure and NPK fertilizer on soil properties and Nutrient uptake of maize (Zea mays L.) plants growth in an ultisol. Proceedings of the 36th Annual Conference of the Soil Science Society of Nigeria (SSSN) on 7th – 11th March, 2012 University of Nigeria Nsukka

Collier, J. R., Collier, B. J., Thames, J. L., & ElSunni, M. M. (1997). Production and evaluation of sugar cane fiber geotextiles: report 2: field testing (No. LA-95-290). Louisiana State University. Department of Chemistry Engineering.

Czerniawska-Kusza, I., & Kusza, G. (2011). The potential of the Phytotoxkit microbiotest for hazard evaluation of sediments in eutrophic freshwater ecosystems. Environmental Monitoring and Assessment, 179, 113-121. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1722-y>

De Corato, U., Sharma, N., & Zimbardi, F. (2011). Use of waste vegetable biomasses treated by steam explosion for the horticultural crop protection. J. Agric. Sci. Technol. B, 1(4), 540-549. ISSN 1939-1250

Dhakal, H. N., Zhang, Z. Y., Richardson, M. O. W., & Errajhi, O. A. Z. (2007). The low velocity impact response of non-woven hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. Composite Structures, 81(4), 559-567. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.10.003>

Dinu, I. (2006). Erosion control products from sugarcane bagasse. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College

Divya, M. Y., Bhagavan, B. V. K., Naidu, M. M., & Subbaramamma, P. (2016). Studies on fiber yield of different genomic groups of banana. *Plant Archives* Vol. 16 No. 2, 2016 pp. 946-948. ISSN 0972-5210

Duque, A., Manzanares, P., Ballesteros, I., & Ballesteros, M. (2016). Chapter 15—Steam Explosion as Lignocellulosic Biomass Pretreatment. En S. I. Mussatto (Ed.), *Biomass Fractionation Technologies for a Lignocellulosic Feedstock Based Biorefinery* (pp. 349-368). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802323-5.00015-3>

Egbujuo, C. I., Fullen, M. A., Guerra, A. J., & Opara, A. I. (2018). Geochemical characterization of banana, buriti palm, jute and coir fibres for use as biogeotextiles for erosion control. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 26(3), 202-215. <https://doi.org/10.3846/16486897.2017.1418365>

Endut, R., Sabri, M. S. A., Aljunid, S. A., Ali, N., Laili, A. R., & Laili, M. H. (2023). Prediction of Potassium (K) Content in Soil Analysis Utilizing Near-Infrared (NIR) Spectroscopy. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 33(1), 92-101.

Espí, E., Salmerón, A., Fontecha, A., García, Y., & Real, A. I. (2006). Plastic films for agricultural applications. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 22(2), 85-102. <https://doi.org/10.1177/8756087906064220>

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2009). High-Level Expert Forum—How to Feed the World in 2050. Office of the Director, Agricultural Development Economics Division, Rome, Italy.

- Fernandes, E. R. K., Marangoni, C., Souza, O., & Sellin, N. (2013). Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. *Energy conversion and management*, 75, 603-608. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.008>
- Fernandes, M., Salvador, A., Alves, M. M., & Vicente, A. A. (2020). Factors affecting polyhydroxyalkanoates biodegradation in soil. *Polymer Degradation and Stability*, 182, 109408. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109408>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO. (2009). High Level Expert Forum—How to Feed the World in 2050. Office of the Director, Agricultural Development Economics Division, Rome, Italy.
- Francioni, M., Kishimoto-Mo, A. W., Tsuboi, S., & Hoshino, Y. T. (2022). Evaluation of the mulch films biodegradation in soil: a methodological review. *Italian Journal of Agronomy*, 17(3).
- Gallos, A., Paës, G., Allais, F., & Beaugrand, J. (2017). Lignocellulosic fibers: a critical review of the extrusion process for enhancement of the properties of natural fiber composites. *RSC advances*, 7(55), 34638-34654. Doi: [10.1039/C7RA05240E](https://doi.org/10.1039/C7RA05240E)
- Gavilanes-Terán, I., Paredes, C., Pérez-Espinosa, A., Ángeles Bustamante, M., Gálvez-Sola, L., & Jara-Samaniego, J. (2015). Opportunities and challenges of organic waste management from the agroindustrial sector in South America: Chimborazo province case Study. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46(sup1), 137-156. <https://doi.org/10.1080/00103624.2014.988584>
- George, J., Bhagawan, S. S., & Thomas, S. (1998). Effects of environment on the properties of low-density polyethylene composites reinforced with pineapple-leaf

fibre. Composites Science and Technology, 58(9), 1471-1485.

[https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(97\)00161-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(97)00161-9)

Ghosh, P. K., Dayal, D., Bandyopadhyay, K. K., & Mohanty, M. (2006). Evaluation of straw and polythene mulch for enhancing productivity of irrigated summer groundnut. Field Crops Research, 99(2-3), 76-86. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.03.004>

Gómez, E. F., & Michel Jr, F. C. (2013). Biodegradability of conventional and bio-based plastics and natural fiber composites during composting, anaerobic digestion and long-term soil incubation. Polymer Degradation and Stability, 98(12), 2583-2591. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.018>.

Gonçalves, F. A., Sanjinez-Argandoña, E. J., & Fonseca, G. G. (2011). Utilization of Agro-Industrial Residues and Municipal Waste of Plant Origin for Cellulosic Ethanol Production. Journal of Environmental Protection, 02(10), 1303-1309. <https://doi.org/10.4236/jep.2011.210150>

Grgas, D., Rukavina, M., Bešlo, D., Štefanac, T., Crnek, V., Šikić, T., Habuda-Stanić, M., & Landeka Dragičević, T. (2023). The Bacterial Degradation of Lignin—A Review. Water, 15(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/w15071272>

Guerrero, A. B., Aguado, P. L., Sánchez, J., & Curt, M. D. (2016). GIS-Based Assessment of Banana Residual Biomass Potential for Ethanol Production and Power Generation: A Case Study. Waste and Biomass Valorization, 7(2), 405-415. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9455-3>

- Gurupranes, S.V., Kumar, A., & P Patil, P. (2023). Effect of corn husk fiber length and diameter on load bearing, fatigue, and DMA properties of biosilica toughened epoxy composite. *Polymer Composites*, 44(6).Doi: 10.1002/pc.27334
- Güven, O., Monteiro, S. N., Moura, E. A., & Drelich, J. W. (2016). Re-emerging field of lignocellulosic fiber–polymer composites and ionizing radiation technology in their formulation. *Polymer Reviews*, 56(4), 702-736.
<https://doi.org/10.1080/15583724.2016.1176037>
- Hao, D., Li, X., Kong, W., Chen, R., Liu, J., Guo, H., Zhou, K. (2023). Phosphorylation regulation of nitrogen, phosphorus, and potassium uptake systems in plants. *The Crop Journal*, 11(4), 1034-1047. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.06.003>
- Hasan, M., Ahmad-Hamdani, M. S., Rosli, A. M., & Hamdam, H. (2021). Bioherbicides: An eco-friendly tool for sustainable weed management. *Plants*, 10(6), 1212.
<https://doi.org/10.3390/plants10061212>
- Hayes, D.G. et al. (2019). Biodegradable Plastic Mulch Films for Sustainable Specialty Crop Production. In: Gutiérrez, T. (eds) *Polymers for Agri-Food Applications* . Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19416-1_11
- Hiremath, S. V., Hiremath, C. R., & Tikotkar, R. G. (2020). Optimization of tribological property of carbon fiber reinforced nano filler filled polymer composites using Taguchi method. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2274, No. 1). AIP Publishing.
<https://doi.org/10.1063/5.0023102>

Hoi, L. W. S., & Martincigh, B. S. (2013). Sugar cane plant fibres: Separation and characterisation. *Industrial crops and products*, 47, 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.02.017>

Hoi, L. W. S., & Martincigh, B. S. (2013). Sugar cane plant fibres: Separation and characterisation. *Industrial crops and products*, 47, 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.02.017>

Holtzapple, M. T., Jun, J. H., Ashok, G., Patibandla, S., & Dale, B. E. (1991). Ammonia Fiber Explosion (AFEX) pretreatment of lignocellulose. In *Symposium Papers-Energy from Biomass and Wastes*.

Hossain, M. K., Dewan, M. W., Hosur, M., & Jeelani, S. (2011). Mechanical performances of surface modified jute fiber reinforced biopol nanophased green composites. *Composites Part B: Engineering*, 42(6), 1701-1707.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.03.010>

Huang, S., Fu, Q., Yan, L., & Kasal, B. (2021). Characterization of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials—A critical review. *Journal of materials research and technology*, 13, 1441-1484.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.076>

Imai, M., K. Ikari, et al. (2004): High-performance hydrolysis of cellulose using mixed cellulase species and ultrasonication pretreatment. *Biochemical Engineering Journal* 17(2): 79-83.

INEC. (2023). Encuesta de superficie y Producción Agropecuaria Continua. Recuperado de:
<https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web->

[inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/2023/Principales_resultados_ESPAC_2023.pdf](https://inec.ec/Estadisticas_agropecuarias/espac/2023/Principales_resultados_ESPAC_2023.pdf)

INEC. (2023). Statistical Yearbook of Ecuador. Recuperado de https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2020/Residuos_solidos_2020/Boletin_Tecnico_Residuos_2020.pdf

INEN. (1998). Fertilizantes o abonos. Definiciones. Primera edición.

Jacquet, N., Maniet, G., Vanderghem, C., Delvigne, F., & Richel, A. (2015). Application of Steam Explosion as Pretreatment on Lignocellulosic Material: A Review. Ind. Eng. Chem. Res., 54, 2593–2598. doi:10.1021/ie503151g.

Jagadeesh, D., Venkatachalam, R., & Nallakumarasamy, G. (2015). Characterisation of banana fiber-a review. J. Environ. Nanotechnol, 4(2), 23-26. <https://doi.org/10.13074/jent.2015.06.152154>

Jayaprakash, K., Osama, A., Rajagopal, R., Goyette, B., & Karthikeyan, O.P. (2022). Agriculture Waste Biomass Repurposed into Natural Fibers: A Circular Bioeconomy Perspective. Bioengineering, 9.

Jayawardhana, K. and G.P. Van Walsum (2004): Modeling of carbonic acid pretreatment process using ASPEN-Plus. Applied biochemistry and biotechnology 113-116: 1087 1102.

Jeyanthi.B, Geetharani.S , Krishnaindhu. J.R. (2019). Development of Needle Punched Mulch Mat using Natural Fibers.

https://www.ijresm.com/Vol.2_2019/Vol2_Iss4_April19/IJRESM_V2_I4_16.pdf

Jiménez, L., & Rodríguez, A. (2010). Valorization of Agricultural Residues by Fractionation of their Components. The Open Agriculture Journal, 4(1), 125-134.
<https://doi.org/10.2174/1874331501004010125>

Josefsson, T., Lennholm, H., & Gellerstedt, G. (2002). Steam explosion of aspen wood. Characterisation of reaction products. <https://doi.org/10.1515/HF.2002.047>

Jústiz-Smith, N. G., Virgo, G. J., & Buchanan, V. E. (2008). Potential of Jamaican banana, coconut coir and bagasse fibres as composite materials. Materials characterization, 59(9), 1273-1278. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.10.011>

Kader, M. A., Senge, M., Mojid, M. A., & Ito, K. (2017). Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. Soil and Tillage Research, 168, 155-166.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2017.01.001>

Kapanen, A., Schettini, E., Vox, G., & Itävaara, M. (2008). Performance and environmental impact of biodegradable films in agriculture: a field study on protected cultivation. Journal of Polymers and the Environment, 16, 109-122.
<https://doi.org/10.1007/s10924-008-0091-x>

Karatas, O., Khataee, A., and Kalderis, D. (2022). Recent progress on the phytotoxic effects of hydrochars and toxicity reduction approaches. Chemosphere, 298, 134357.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134357>.

Kirchherr, J., Reike, D. & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*. Volume 127. Pages 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.

Kirk-Othmer, D. F. (2001). *Encyclopedia of Chemical Technology*, 4th edn., Vol. 20.

Kokta, B. V., & Ahmed, A. (1998). Steam explosion pulping. *Environmentally friendly technologies for the pulp and paper industry*, 191-214. <https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/pdf1998/kokta98a.pdf>

Kootstra, A.M.J., H.H. Beftink, et al. (2009): Comparison of dilute mineral and organic acid pretreatment for enzymatic hydrolysis of wheat straw. *Biochemical Engineering Journal* 46(2): 126-131.

Krasznai, D. J., Champagne Hartley, R., Roy, H. M., Champagne, P., & Cunningham, M. F. (2018). Compositional analysis of lignocellulosic biomass: Conventional methodologies and future outlook. *Critical Reviews in Biotechnology*, 38(2), 199-217. <https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1331336>

Kumar, R., Yakubu, M. K., & Anandjiwala, R. D. (2010). Biodegradation of flax fiber reinforced poly lactic acid. *Express Polymer Letters*, 4(7), 423-430. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2010.53>

Lamine, M., Hamdi, Z., Zemni, H., Zohra Rahali, F., Melki, I., Mliki, A., Gargouri, M. (2024). From residue to resource: The recovery of high-added values compounds through an integral green valorization of citrus residual biomass. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37, 101379. <https://sciencedirect.ucuenca.elogim.com/science/article/pii/S2352554123004138>

Lidman Olsson, E. O., Glarborg, P., Dam-Johansen, K., & Wu, H. (2023). Review of Phosphorus Chemistry in the Thermal Conversion of Biomass: Progress and Perspectives. *Energy & Fuels*, 37(10), 6907-6998. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c04048>

Litvak, O., & Litvak, S. (2023). Implementation of the circular economy model in the agricultural sector of Ukraine. *Baltic Journal of Economic Studies*, 9(2), Article 2. <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2023-9-2-146-156>

López-Valdez, F., Ríos-Cortes, A. M., López-Gayou, V., Torres-Valencia, CabreraHilerio, S. L., & Miranda-Arámbula, M. (2021). Fitotóxicos como herbicidas naturales y otras alternativas de uso. *Frontera Biotecnológica*, 18, 22-28. <https://www.revistafronterabiotecnologica.cibatlaxcala.ipn.mx/volumen/vol18/pdf/vol-18-4.pdf>

Luo, T., Huang, H., Mei, Z., Shen, F., Ge, Y., Hu, G., & Meng, X. (2019). Hydrothermal pretreatment of rice straw at relatively lower temperature to improve biogas production via anaerobic digestion. *Chinese Chemical Letters*, 30(6), 1219-1223. <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2019.03.018>

Lupoi, J. S., Singh, S., Simmons, B. A., & Henry, R. J. (2014). Assessment of Lignocellulosic Biomass Using Analytical Spectroscopy: An Evolution to High-Throughput Techniques. *BioEnergy Research*, 7(1), 1-23. <https://doi.org/10.1007/s12155-013-9352-1>

Luthra, P., Vimal, K. K., Goel, V., Singh, R., & Kapur, G. S. (2020). Biodegradation studies of polypropylene/natural fiber composites. *SN Applied Sciences*, 2, 1-13. <https://doi.org/10.7569/JRM.2014.634120>

Luzardo P., Ruíz, E., & Pérez, J. (2023). TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA EN BIOCOMBUSTIBLE DE SEGUNDA GENERACIÓN: ESTADO DEL ARTE DEL PRETRATAMIENTO. *Revista Bases de la Ciencia*, 7(ESPECIAL), 3-22. <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v7i3.4243>

Machado, P., Araujo, J., Afonso, G., Lucia, T., Ramires, T., Fuentes-Guevara, M., Bilhalva, L., Kunde, E. (2021). Phytotoxicity test in check: Proposition of methodology for comparison of different method adaptations usually used worldwide. *Journal of Environmental Management*, 291, 112698. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112698>

Mahdi, E., Ochoa, D. R. H., Vaziri, A., Dean, A., & Kucukvar, M. (2021). Khalasa date palm leaf fiber as a potential reinforcement for polymeric composite materials. *Composite Structures*, 265, 113501. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113501>

Maji, P., Dhar, D. G., Misra, P., & Dhar, P. (2020). *Costus speciosus* (Koen ex. Retz.) Sm.: Current status and future industrial prospects. *Industrial crops and products*, 152, 112571. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112571>

Malinconico, M., Barbara Immirzi, G. S., Vox, E. S. G., & Mugnozza, G. S. (2007). An overview on innovative biodegradable materials for agricultural applications. *Progress in polymer degradation and stability research*, 69 - 114. ISBN 978-1-60021-828-6.

Mani J. (2002). Early events in environmental stresses in plants: Induction mechanisms of oxidative stress. In: D. Inzè and M.V. Montague (eds.) *Oxidative stress in plants*. Taylor and Francis, New York. pp 217-246

Manna, K.; Kundu, MC; Saha, B.; Ghosh, GK (2018). Efecto del acolchado agrotextil de yute no tejido sobre la salud del suelo y la productividad del brócoli (*Brassica oleracea* L.) en suelo laterítico. *Environ Monit Assess* 190, 82. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6452-y>

Martín-Davison, J. S., Ballesteros, M., Manzanares, P., Sepúlveda, X. P.-B., & Vergara-Fernández, A. (2015). Effects of Temperature on Steam Explosion Pretreatment of Poplar Hybrids with Different Lignin Contents in Bioethanol Production. *International Journal of Green Energy*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15435075.2014.887569>

Martínez, Á. T., Speranza, M., Ruiz-Dueñas, F. J., Ferreira, P., Camarero, S., Guillén, F., ... & Río Andrade, J. C. D. (2005). Biodegradation of lignocellulosics: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin.

Mendes, P. M., Ribeiro, J. A., Martins, G. A., Lucia Jr, T., Araujo, T. R., Fuentes-Guevara, M. D., ... & Corrêa, É. K. (2021). Phytotoxicity test in check: Proposition of methodology for comparison of different method adaptations usually used worldwide. *Journal of Environmental Management*, 291, 112698. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112698>

Menofy, N. G., & Khattab, A. M. (2022). Plastics Biodegradation and Biofragmentation. En G. A. M. Ali & A. S. H. Makhoulf (Eds.), *Handbook of Biodegradable Materials* (pp. 1-30). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83783-9_22-1

Menossi, M., Cisneros, M., Alvarez, V. A., & Casalongué, C. (2021). Current and emerging biodegradable mulch films based on polysaccharide bio-composites. A review.

Agronomy for Sustainable Development, 41(4), 53. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00685-0>

Miao, M., Pierlot, A. P., Millington, K., Gordon, S. G., Best, A., & Clarke, M. (2013). Biodegradable mulch fabric by surface fibrillation and entanglement of plant fibers. *Textile Research Journal*, 83(18), 1906-1917. <https://doi.org/10.1177/0040517513483861>

Mohammed, M., Jawad, A. J. A. M., Mohammed, A. M., Oleiwi, J. K., Adam, T., Osman, A. F., ... & Jaafar, M. (2023). Challenges and advancement in water absorption of natural fiber-reinforced polymer composites. *Polymer Testing*, 124, 108083.

Mok, W.S.L. and M.J. Antal Jr (1992): Uncatalyzed solvolysis of whole biomass hemicellulose by hot compressed liquid water. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 31(4): 1157-1161.

Mostafa, N.A., Farag, A.A., Abo-Dief, H.M., & Tayeb, A.M. (2015). Production of biodegradable plastic from agricultural wastes. *Arabian Journal of Chemistry*, 11, 546-553.

Muneer, F. (2013). Evaluation of the sustainability of hemp fiber reinforced wheat gluten plastics [Second cycle, A2E]. SLU, Dept. of Biosystems and Technology (from 130101). <https://stud.epsilon.slu.se/5179/>

Muñoz-Huerta, R., Guevara-Gonzalez, R., Contreras-Medina, L., Torres-Pacheco, I., Prado-Olivarez, J., & Ocampo-Velazquez, R. (2013). A Review of Methods for Sensing the Nitrogen Status in Plants: Advantages, Disadvantages and Recent Advances. *Sensors*, 13(8), 10823-10843. <https://doi.org/10.3390/s130810823>

- Neher, B., Hossain, R., Fatima, K., Gafur, M. A., Hossain, Md. A., & Ahmed, F. (2020). Study of the Physical, Mechanical and Thermal Properties of Banana Fiber Reinforced HDPE Composites. *Materials Sciences and Applications*, 11(04), 245-262. <https://doi.org/10.4236/msa.2020.114017>
- Nguyen, T. T., & Indraratna, B. (2023). Natural Fibre for Geotechnical Applications: Concepts, Achievements and Challenges. *Sustainability*, 15(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/su15118603>
- Noor, R. S., Shah, A. N., Tahir, M. B., Umair, M., Nawaz, M., Ali, A., Ercisli, S., Abdelsalam, N. R., Ali, H. M., Yang, S. H., Ullah, S., & Assiri, M. A. (2024). Recent trends and advances in additive-mediated composting technology for agricultural waste resources: A comprehensive review. *ACS Omega*, 9(8), 8632–8653. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06516>
- OECD (2022). Plastic waste management and recycling. Recuperado de <https://www.oecd.org/environment/plastic-pollution-is-growing-relentlessly-as-waste-management-and-recycling-fall-short.htm>
- Olatunji O and Ayuba, SA (2012). Effect of combined applications of poultry manure and NPK 20-10-10 fertilizer on soil chemical properties and yield of maize (*Zea mays* L.). Proceedings of the 35th Annual Conference of the Soil Science Society of Nigeria (SSSN). 7th – 11th March, 2011, University of Technology Minna.
- OMS y FAO. (2017). Manual sobre la elaboración y uso de las especificaciones de plaguicidas de la FAO y la OMS. Roma. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i5713s/i5713s.pdf>

- Othman, H., Mamdouh, F., Yousif, A. R., Ebrahim, S. A., Reda, E. M., & Hassabo, A. G. (2024). The transformative power of green chemistry: Advancing sustainability and natural fiber utilization. *Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science*, 21(3), 519-536. Doi: [10.21608/jtcps.2024.258905.1264](https://doi.org/10.21608/jtcps.2024.258905.1264)
- Ouali, A. A., Rinberg, R., Nendel, W., Kroll, L., Siegel, C., Buchelt, B., & Spange, S. (2017). Natural unidirectional sheet processes for fibre reinforced bioplastics. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1914, No. 1). AIP Publishing. Doi: <https://doi.org/10.1063/1.5016725>
- Palaniyappan, S., Kaliyamoorthy, R., & Gnanavelbabu, A. (2016). Mechanical Properties of Almond Shell-Sugarcane Leaves Hybrid Epoxy Polymer Composite. *Applied Mechanics and Materials*, 852, 43-48. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.852.43>
- Pathak, V.M., Navneet. (2017). Review on the current status of polymer degradation: a microbial approach. *Bioresour. Bioprocess.* 4, 15. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0145-9>
- Patil, D. (2020). Agricultural waste-utilization and management. *Food Safety 2020*. Dubai.
- Peng, L., & Zhong, L. (2005). Steam Explosion of Biomass as a Pretreatment for Conversion to Ethanol [J]. *Forestry Science and Technology*, 30(3), 53-56.
- Pérez, J., Munoz-Dorado, J., De la Rubia, T. D. L. R., & Martinez, J. (2002). Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *International microbiology*, 5, 53-63. <https://doi.org/10.1007/s10123-002-0062-3>

Pinchao-Pinchao, Y., Osorio-Mora, O., Checa-Coral, O. & Tobar, E. (2019). Study on the Rate and Time of Biodegradation under Controlled Conditions of Natural Fibers of Figue (Furcraea andina) and Cotton (Gossypium barbadense). Información tecnológica, 30(4), 59-68. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000400059>

Pires, J. R. A., Souza, V. G. L., Fuciños, P., Pastrana, L., & Fernando, A. L. (2022). Methodologies to assess the biodegradability of bio-based polymers—current knowledge and existing gaps. Polymers, 14(7), 1359.

Prasomsook, S. (1973). Banana Yields in Relation to Nitrogen and Potassium Composition of Leaves (Doctoral dissertation).

Preethi, P. and G. Balakrishna Murthy (2013). Physical and Chemical properties of Banana Fiber Extracted from Commercial Banana Cultivars Grown in Tamilnadu State. Agrotechnology. S11:008.doi: 10.4172/2168-9881.S11-008.

Prieto Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2017). Economía circular: relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación. Memoria Investigaciones En Ingeniería, (15), 85–95. Recuperado a partir de <https://revistas.um.edu.uy/index.php/ingenieria/article/view/308>

Rajeshkumar, L., Kumar, P. S., Ramesh, M., Sanjay, M. R., & Siengchin, S. (2023). Assessment of biodegradation of lignocellulosic fiber-based composites – A systematic review. International Journal of Biological Macromolecules, 253, 127237. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127237>

- Ramos, L. P. (2003). The chemistry involved in the steam treatment of lignocellulosic materials. *Química Nova*, 26, 863-871. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000600015>
- Rao, C. S., Rao, A. S., & Takkar, P. N. (1998). Evaluation of several methods for determining the potassium content in diverse plant materials. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 29(17-18), 2785-2792.
- Rasheed, H. A., Adeleke, A. A., Nzerem, P., Olosho, A. I., Ogedengbe, T. S., & Jesuloluwa, S. (2024). Isolation, characterization and response surface method optimization of cellulose from hybridized agricultural wastes. *Scientific Reports*, 14(1), 14310. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65229-4>
- Raven, P.H., R.F. Evert, et al. (1992): *Biology of plants* (6th edition). W.H. Freeman and company/Worth Publishers.
- Redwan, A., Badri, K. H., & Baharum, A. (2017). An Overview on Lignocellulosic Fibers Reinforced Polymer Composite Materials. *Journal of Al-Nahrain University*, 20(1), 25-31. Doi: 10.22401/JNUS.20.1.04
- Rennenberg, H., Schneider, S., & Weber, P. (1996). Analysis of uptake and allocation of nitrogen and sulphur compounds by trees in the field. *Journal of Experimental Botany*, 47(10), 1491-1498. <https://doi.org/10.1093/jxb/47.10.1491>
- Restrepo-Osorio, A., Álvarez-López, C., Jaramillo-Quiceno, N., & Fernández-Morales, P. (2019). *Agrotextiles and crop protection textiles. High performance technical textiles*. Wiley, Hoboken, NJ. <https://doi.org/10.1002/9781119325062.ch10>.

Riera, M. A., Maldonado, S., & Palma, R. (2023). Multicriteria analysis and GIS applied to the selection of agroindustrial waste. A case study contextualized to the Ecuadorian reality. *Journal of Cleaner Production*, 429, 139505. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139505>

Rodrigues, R. C. L. B., Green Rodrigues, B., Vieira Canettieri, E., Acosta Martinez, E., Palladino, F., Wisniewski Jr, A., & Rodrigues Jr, D. (2022). Comprehensive approach of methods for microstructural analysis and analytical tools in lignocellulosic biomass assessment – A review. *Bioresource Technology*, 348, 126627. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126627>

Rodríguez, L. J., Álvarez-Láinez, M. L., & Orrego, C. E. (2022). Optimization of processing conditions and mechanical properties of banana fiber-reinforced polylactic acid/high-density polyethylene biocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(3), 51501. <https://doi.org/10.1002/app.51501>

Ronco-Campaña, A. (2018). Fitotóxicos como alternativa a herbicidas contaminantes. *MoleQla: Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, 30, 71-74. <https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/moleqla/documentos/Numero30/Fitotoxicos.pdf>

Roohi, Bano, K., Kuddus, M., R. Zaheer, M., Zia, Q., F. Khan, M., ... & Aliev, G. (2017). Microbial enzymatic degradation of biodegradable plastics. *Current pharmaceutical biotechnology*, 18(5), 429-440. <https://doi.org/10.2174/1389201018666170523165742>

Rosero, V. J. R., Carrera, J. A., Chimbo, J. E., Pilco, C. J., & Guana, D. M. (2022). Obtencion de Etanol a partir residuos agricolas obtaining of bioethanol from lignocellulosic

agricultural waste: Obtenção de Etanol a partir de resíduos agrícolas obtenção de bioetanol a partir de resíduos agrícolas lignocelulósicos. STUDIES IN ENVIRONMENTAL AND ANIMAL SCIENCES, 3(3), 1612-1631. <https://doi.org/10.54020/seasv3n3-023>

Rudá, A., Albuquerque, M., Santos, C., Herbert, T., Fonseca, V., Valin, J., Dos Santos, M., De Lima, A., De Amorim, W. y De Carvalho, L. (2024). Effect of Water Absorption and Stacking Sequences on the Tensile Properties and Damage Mechanisms of Hybrid Polyester/Glass/Jute Composites. Polymers 16, no. 7: 925. <https://doi.org/10.3390/polym16070925>

Ruggero, F., Gori, R., & Lubello, C. (2019). Methodologies to assess biodegradation of bioplastics during aerobic composting and anaerobic digestion: A review. Waste Management & Research

Ruiz, E., Canales, R., García, G. (2019). La medición de la economía circular. Marcos, indicadores e impacto en la gestión empresarial. Forética, Madrid, Spain. ISBN: 978-84-09-13202-7. https://foretica.org/wp-content/uploads/informe_medida_economia_circular_foretica.pdf

Ruiz, E., Cara, C., Manzanares, P., Ballesteros, M., & Castro, E. (2008). Evaluation of steam explosion pre-treatment for enzymatic hydrolysis of sunflower stalks. Enzyme and microbial technology, 42(2), 160-166. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2007.09.002>

Salvador, J. O., Moreira, A., & Muraoka, T. (1999). EFEITO DA OMISSÃO COMBINADA DE N, P, K E S NOS TEORES FOLIARES DE MACRONUTRIENTES EM MUDAS DE GOIABEIRA. Scientia Agricola, 56(2), 501-507. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161999000200033>

- Samaranayake, G., Li, X., & Glasser, W. G. (1994). Solvent accessibility of steam exploded cellulose. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1994.48.s1.69>
- Sapuan, S. M. (2014). Tropical natural fibre composites: properties, manufacture and applications. Springer, Singapore. doi, 10(9780857099228.3), 365.
- Sarker, T. R., Pattnaik, F., Nanda, S., Dalai, A. K., Meda, V., & Naik, S. (2021). Hydrothermal pretreatment technologies for lignocellulosic biomass: A review of steam explosion and subcritical water hydrolysis. *Chemosphere*, 284, 131372. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131372>
- Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., & Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 26(3), 246-265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>
- Shogren, R. L., & Rousseau, R. J. (2005). Field testing of paper/polymerized vegetable oil mulches for enhancing growth of eastern cottonwood trees for pulp. *Forest Ecology and Management*, 208(1-3), 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.11.019>
- Sifontes, M. (2019). La biomasa: Fuente alternativa de combustibles y compuestos químicos. *Anales de la Real Sociedad Española de Química*. <https://www.semanticscholar.org/paper/La-biomasa%3A-fuente-alternativa-de-combustibles-y-Sifontes/916a0728c2ec28205baf4bfb66c10d24678f54cc>
- Silva, R., Haraguchi, S. K., Muniz, E. C., & Rubira, A. F. (2009). Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. *Química Nova*, 32(3), 661-671. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000300010>

Singh, T. B., Ali, A., Prasad, M., Yadav, A., Shrivastav, P., Goyal, D., & Dantu, P. K. (2020).

Role of organic fertilizers in improving soil fertility. Contaminants in agriculture: sources, impacts and management, 61-77. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41552-5_3

Sobrero, M. C., & Ronco, A. (2004). Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga

Lactuca sativa L. Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas: estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 63-70.

Soltys, D., Krasuska, U., Bogatek, R., & Gniazdowski, A. (2013). Allelochemicals as

Bioherbicides — Present and Perspectives. Polonia. InTech. <https://doi.org/10.5772/56185>

Stark, N. (2001). Influence of moisture absorption on mechanical properties of wood flour-

polypropylene composites. Journal of thermoplastic composite materials, 14(5), 421-432. <https://doi.org/10.1106/UDKY-0403-626E-1H4P>

Statista. (2023). Global production of plastics.

<https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>

Strapchuk, S. (2022). Business models of circular economy in ensuring sustainable

development of agricultural enterprises of Ukraine. "Economy. Finances. Management: Topical issues of science and practical activity".

Suárez Matallana, G. A., Sánchez Atahualpa, S. R., Lazaro Riquez, A., & Rodríguez Zúñiga,

U. F. (2022). CONCEPTOS DE BIOCATÁLISIS DE LA LIGNOCELULOSA DESDE UN

ENFOQUE DE INGENIERÍA DE PROCESOS Y SISTEMAS: UNA REVISIÓN.

Perfiles, 1(28), 37-51. <https://doi.org/10.47187/perf.v1i28.179>

Subagyo, A., & Chafidz, A. (2020). Banana Pseudo-Stem Fiber: Preparation, Characteristics, and Applications. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.82204

Sui, W., & Chen, H. (2015). Study on loading coefficient in steam explosion process of corn stalk. Bioresource Technology, 179, 534-542. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.045>

Sultanova M., Apysheva A., Domalatov Ye. (2022). Circular economy in agricultural sector. Problems of AgriMarket. <https://doi.org/10.46666/2022-1.2708-9991.06>

Sun, Y. and J. Cheng (2002): Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review. Bioresource Technology 83(1): 1-11.

Szara, M., Baran, A., Tarnawski, M., & Koniarz, T. (2017). The application of the germination index in the assessment of the phytotoxicity of bottom sediments from the Rybnik Reservoir. Geology, Geophysics and Environment, 43(4). Doi: [10.7494/geol.2017.43.4.327](https://doi.org/10.7494/geol.2017.43.4.327)

Tazi, M., Erchiqui, F., Godard, F., & Kaddami, H. (2014). Evaluation of mechanical properties and durability performance of HDPE-wood composites. Journal of Renewable Materials, 2(4), 258-263. <https://doi.org/10.7569/JRM.2014.634120>

Teymouri, F., Laureano-Perez, L., Alizadeh, H., & Dale, B. E. (2005). Optimization of the ammonia fiber explosion (AFEX) treatment parameters for enzymatic hydrolysis of

corn stover. Bioresource technology, 96(18), 2014-2018.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.01.016>

Thakur, V. K., Thakur, M. K., & Gupta, R. K. (2013). Rapid synthesis of graft copolymers from natural cellulose fibers. Carbohydrate polymers, 98(1), 820-828.

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.06.072>

Thames, J. L. (1997). Sugar cane fiber geotextiles. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College. Doi:[10.31390/gradschool_disstheses.6449](https://doi.org/10.31390/gradschool_disstheses.6449)

Thummar, A. (2024). Sustainable Ways to Utilize and Manage the Agricultural Waste. Volume 6, Issue 1. <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i01.12457>

Torres, F. G., Arroyo, O. H., Grande, C., & Esparza, E. (2006). Bio- and Photo-degradation of Natural Fiber Reinforced Starch-based Biocomposites. International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials, 55(12), 1115-1132. <https://doi.org/10.1080/00914030600692109>

Vadivel, K., S. SOLOMON, A. VIJAYAKUMAR, & KUMAR, R. S. (2017). A Review Paper on Design and Fabrication of Banana Fiber Extraction Machine and Evaluation of Banana Fiber Properties

Vanicková, R. (2014). Nutrient Management in Processing of Steam-Exploded Lignocellulose Phytomass. doi: 10.1002/ceat.201400341

Varnero M, M. T., Rojas A, C., & Orellana R, R. (2007). Phytotoxicity indices of organic residues during composting. <https://doi.org/10.3390/ijpb15020019>

Vázquez-Rodríguez, G. A., & Beltrán-Hernández, R. I. (2004). Pruebas normalizadas para la evaluación de la biodegradabilidad de sustancias químicas. Una revisión. *Interciencia*, 29(10), 568-573.

Velasco-Muñoz, J.F., Mendoza, J.M.F., Aznar-Sánchez, J.A., Gallego-Schmid, A., (2021). Circular economy implementation in the agricultural sector: definition, strategies and indicators. *Resour. Conserv. Recycl.*, 170, 105618. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105618>.

Wang, K., Chen, J., Sun, S. N., & Sun, R. C. (2015). Steam explosion. In *Pretreatment of biomass* (pp. 75-104). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800080-9.00006-2>

Wang, X. T., & Liu, L. S. (2010). Steam explosion pretreatment technique and application in biomass conversion. *Advanced Materials Research*, 113, 525-528.

Wood, RA (1990). El papel del nitrógeno, el fósforo y el potasio en la producción de caña de azúcar en Sudáfrica. *Fertilizer Research*, 26(1-3), 89–98. doi:10.1007/bf01048746

Wright, J. (1988). Ethanol from biomass by enzymatic hydrolysis, *Chem. Eng. Prog.* 8

Xanthopoulou, E., Chrysafi, I., Polychronidis, P., Zamboulis, A., & Bikiaris, D. N. (2023). Evaluation of Eco-Friendly Hemp-Fiber-Reinforced Recycled HDPE Composites. *Journal of Composites Science*, 7(4), 138. <https://doi.org/10.3390/jcs7040138>

Xiao, Y., Zhao, H., Wu, B., Fu, X., Hu, K., Zhou, C., & Lei, J. (2018). Preparation and characterization of waterborne polyurethane based on diphenylmethane diisocyanate-50. *Advances in Polymer Technology*, 37(2), 596-605. <https://doi.org/10.1002/adv.21700>.

- Xing, K., Zhao, M., Niinemets, Ü., Niu, S., Tian, J., Jiang, Y., Chen, H. Y. H., White, P. J., Guo, D., & Ma, Z. (2021). Relationships Between Leaf Carbon and Macronutrients Across Woody Species and Forest Ecosystems Highlight How Carbon Is Allocated to Leaf Structural Function. *Frontiers in Plant Science*, 12, 674932. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.674932>
- Xing, K., Zhao, M., Niinemets, Ü., Niu, S., Tian, J., Jiang, Y., ... & Ma, Z. (2021). Relationships between leaf carbon and macronutrients across woody species and forest ecosystems highlight how carbon is allocated to leaf structural function. *Frontiers in plant science*, 12, 674932. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.674932>
- Yahaya, S.M., Mahmud, A.A., Abdullahi, M., Haruna, A. (2023). Recent advances in the chemistry of nitrogen, phosphorus and potassium as fertilizers in soil: a review. *Pedosphere*, 33, 385–406. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.07.012>.
- Yamunadevi, S. & Divya, M. (2023). A review on natural fibers reinforced composite and its applications. DOI: 10.46647/ijetms.2023.v07i03.126.
- Yu, K. H., Zhang, Y., Li, D., Montenegro-Marin, C. E., & Kumar, P. M. (2021). Environmental planning based on reduce, reuse, recycle and recover using artificial intelligence. *Environmental Impact Assessment Review*, 86, 106492. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106492>
- Zhang, H., Han, L. & Dong, H. (2021). An insight to pretreatment, enzyme adsorption and enzymatic hydrolysis of lignocellulosics biomass: Experimental and modeling studies. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110758>

Ziegler-Devin I., Chrusciel L., Brosse N. (2021). Steam Explosion Pretreatment of Lignocellulosic Biomass: A Mini-Review of Theoretical and Experimental Approaches. Frontiers in Chemistry. Doi: 10.3389/fchem.2021.705358. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fchem.2021.705358>.

Zoungranan, Y., Lynda, E., Dobi-Brice, K. K., Tchirioua, E., Bakary, C., & Yannick, D. D. (2020). Influence of natural factors on the biodegradation of simple and composite bioplastics based on cassava starch and corn starch. Journal of Environmental Chemical Engineering, 8(5), 104396.