Estrategias socioambientales y de biotransformación en el cultivo de plátano (*Musa paradisiaca* L.)

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA

Grupo de Investigación: Inyumacizo; Pasos de Libertad, CIER, CIAPSC

Sello Editorial
Universidad Nacional
Abierta y a Distancia

ESTRATEGIAS SOCIOAMBIENTALES Y DE BIOTRANSFORMACIÓN EN EL CULTIVO DE PLÁTANO (*MUSA PARADISIACA* L.)

Autores: Danilo Bonilla Trujillo, Andrés Mauricio Munar Samboní, Nelly María Méndez Pedroza, Carlos Guillermo Mesa Mejía, Paola Andrea Tenorio Sánchez, Francisco José Montealegre Torres, Jeisson Tobías Rengifo Cuervo, Shyrley Rocío Vargas Paredes, Katherine Rivera Quintero, Eliana Paola Rubio Portela, Yeimi Marcela Avilez Bedoya, Lina Gisselth Ospina Aguilar, Juan Pablo Castañeda-Niño, Yean Carlos Zapata-Diaz, Margarita del Rosario Salazar-Sánchez, Rosmery Carolina Imbachi-Hoyos.

Grupos de Investigación: Inyumacizo; Pasos de Libertad, CIER, CIAPSC

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA (UNAD)

Jaime Alberto Leal Afanador
Rector

Constanza Abadía García
Vicerrectora académica y de Investigación

Leonardo Yunda Perlaza
Vicerrector de Medios y Mediaciones Pedagógicas

Édgar Guillermo Rodríguez Díaz
Vicerrector de Servicios a Aspirantes, Estudiantes y Egresados

Leonardo Evemeleth Sánchez Torres
Vicerrector de Relaciones Intersistémicas e Internacionales

Julialba Ángel Osorio
Vicerrectora de Inclusión Social para el Desarrollo Regional y la Proyección Comunitaria

Jordano Salamanca Bastidas
Decano Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Juan Sebastián Chiriví Salomón
Líder Nacional del Sistema de Gestión de la Investigación (SIGI)

Martín Gómez Orduz
Líder Sello Editorial UNAD

Estrategias socioambientales y de biotransformación en el cultivo de plátano (*Musa paradisiaca* L.)

Autores: Danilo Bonilla Trujillo, Andrés Mauricio Munar Samboní, Nelly María Méndez Pedroza, Carlos Guillermo Mesa Mejía, Paola Andrea Tenorio Sánchez, Francisco José Montealegre Torres, Jeisson Tobías Rengifo Cuervo, Shyrley Rocío Vargas Paredes, Katherine Rivera Quintero, Eliana Paola Rubio Portela, Yeimi Marcela Avilez Bedoya, Lina Gisselth Ospina Aguilar, Juan Pablo Castañeda-Niño, Yean Carlos Zapata-Diaz, Margarita del Rosario Salazar-Sánchez, Rosmery Carolina Imbachi-Hoyos.

Grupos de Investigación: Inyumacizo; Pasos de Libertad, CIER, CIAPSC

ISBN:

e-ISBN:

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA)
© Editorial
Sello Editorial UNAD
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Calle 14 sur N. 14-23

Bogotá D.C.
Julio de 2025

Corrección de textos: Armando Robledo Rico

Diagramación: Natalia Herrera

Edición integral: Hipertexto SAS

Cómo citar este libro: Bonilla Trujillo, D., Munar Samboní, A., Méndez Pedroza, N., Mesa Mejía, C., Tenorio Sánchez, P., Montealegre Torres, F., Rengifo Cuervo, J., Vargas Paredes, S., Rivera Quintero, K., Rubio Portela, E., Avilez Bedoya, Y., Ospina Aguilar, L., Castañeda-Niño, J., Zapata-Diaz, Y., Salazar-Sánchez, M. y Imbachi-Hoyos, R. (2025). *Estrategias socioambientales y de biotransformación en el cultivo de plátano* (*Musa paradisiaca* L.). Sello Editorial UNAD. DOI PENDIENTE.

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons-Atribución-No comercial-Sin Derivadas 4.0 internacional. https://co.creativecommons.org/?page_id=13

RESEÑA DEL LIBRO

En este libro se consolidan resultados derivados del proyecto de investigación: "*Generación de valor agregado y adopción tecnológica para la transformación de los residuos del cultivo de plátano (Musa paradisiaca L.) en municipios del departamento del Tolima - Código BPIN: 2021000100302"* financiado por el Fondo de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías y el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, Minciencias.

La publicación denominada: *"Estrategias Socioambientales y de Biotransformación en el Cultivo de Plátano (Musa paradisiaca L.)"* recopila metodologías para la evaluación del impacto ambiental del cultivo de plátano; valoración de aspectos psicosociales desde la experiencia comunitaria; aprovechamiento integral y análisis de biodegradación de los subproductos.

El libro está dividido en cuatro capítulos. El primero, denominado "Metodologías para la evaluación de impacto ambiental y elaboración de línea base: Estudio de caso del cultivo de plátano en el departamento del Tolima, Colombia", destaca la necesidad de evaluar los impactos ambientales de las prácticas agrícolas y establece un punto de referencia para futuros análisis y evaluaciones. Este enfoque metodológico proporciona información esencial para identificar y mitigar impactos negativos, promover prácticas agrícolas sostenibles y apoyar la toma de decisiones, lo que fortalece la capacidad de adaptación al cambio climático y mejora la calidad de vida de las comunidades.

El segundo capítulo, denominado "Gestión psicosocial en la generación de valor agregado en el cultivo de plátano: abordaje desde la experiencia comunitaria", permitió identificar necesidades urgentes de intervenciones psicosociales integrales en la comunidad. Este enfoque promueve el bienestar social y emocional de los agricultores, mejorando su capacidad de aclimatación y resiliencia, fomentando la cohesión social, la participación activa y el sentido de pertenencia, lo que resulta en prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes.

En el tercer capítulo denominado "Aprovechamiento integral de los subproductos del plátano para el desarrollo de materiales compuestos biobasados", fue realizado un conjunto de procesamientos en racimos y pseudotallos de plátano de cuatro variedades (Dominico, Hartón, Dominico Hartón y Africano) provenientes de los municipios de Casabianca y Herveo, departamento del Tolima, para la obtención de almidón y fibras lignocelulósicas. Este enfoque es importante para la sostenibilidad y la economía circular, al transformar residuos agrícolas en recursos valiosos, reduciendo el impacto ambiental y promoviendo prácticas agrícolas sostenibles. Así mismo, promueve la creación de nuevas oportunidades de mercado en el sector de bioproductos.

El cuarto y último capítulo denominado “Análisis de biodegradación de residuos de plátano: perspectivas y desafíos” consolida importantes resultados relacionados con evaluaciones exhaustivas de biodegradabilidad de los residuos del cultivo de plátano. Este análisis permite optimizar procesos para minimizar residuos y emisiones, promoviendo prácticas agrícolas más limpias. Además, identifica desafíos como la eficiencia de descomposición y la integración con tecnologías existentes.

Este documento representa un recurso valioso para la comunidad académica, los profesionales, expertos, técnicos y la comunidad en general, con interés en áreas de gestión ambiental, psicología comunitaria y bioeconomía. El libro es fundamental para abordar la sostenibilidad agrícola desde múltiples perspectivas, abarcando la evaluación ambiental, esencial para entender y mitigar los impactos del cultivo y la gestión psicosocial, que mejora el bienestar y la cohesión de las comunidades agrícolas. Además, se centra en la biotransformación y biodegradación de subproductos, promoviendo el aprovechamiento integral de residuos para la creación de bioproductos. Este enfoque integral no solo impulsa prácticas agrícolas más sostenibles, sino que también genera valor agregado económico y social, contribuyendo al desarrollo sustentable de la región.

Este documento representa un recurso valioso para la comunidad académica, los profesionales, expertos, técnicos y la comunidad en general, con interés en áreas de gestión ambiental, psicología comunitaria y bioeconomía.

RESEÑA DE LOS AUTORES

Danilo Bonilla Trujillo

Médico Veterinario Zootecnista de la Universidad del Tolima; Especialista en Pedagogía para el Aprendizaje Autónomo de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD; Magíster en Ciencias Pecuarias de la Universidad del Tolima y Docente de la de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA), (UNAD), CEAD, Ibagué, Colombia.
Correo electrónico: danilo.bonilla@unad.edu.co

Andrés Mauricio Munar Samboní

Ingeniero Ambiental egresado de la Universidad del Cauca; Magíster en Ecología y Gestión de Ecosistemas Estratégicos de la Universidad Surcolombiana; Doctor en Recursos hídricos y Saneamiento Ambiental de la Universidade Federal do Río Grande do Sul (UFRGS), Brasil, donde también cuenta con una Estancia Posdoctoral en Recursos Hídricos y Cambio Climático; Investigador Asociado (I) Minciencias; Líder del Nodo Especializado de Conocimiento de los Espacios Rurales CIER de la UNAD y Docente Investigador de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA), (UNAD), CCAV Pitalito, Colombia.
Correo electrónico: andres.munar@unad.edu.co

Nelly María Méndez Pedroza

Ingeniera Forestal egresada de la Universidad del Tolima; Especialista en Gerencia estratégica de Mercadeo y Magíster en Administración de Organizaciones de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD; Doctora en Desarrollo Sostenible de la Universidad Católica de Ávila, España; Líder Zona Sur de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA); y directora del Grupo de Investigación Inyumacizo (UNAD), Colombia.
Correo electrónico: nelly.mendez@unad.edu.co

Carlos Guillermo Mesa Mejía

Ingeniero Sanitario y Ambiental de la Universidad de Boyacá. Especialista en Educación Superior a Distancia de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Magíster en Educación de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Docente de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA), CEAD Ibagué, Colombia.
Correo electrónico: carlos.mesa@unad.edu.co

Paola Andrea Tenorio Sánchez

Ingeniera Ambiental de la Universidad Central del Valle del Cauca; Especialista en Docencia Universitaria de la Corporación Universidad Piloto de Colombia; Magíster en Sistemas Integrados de Gestión de la Universidad Internacional de La Rioja; y Docente de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA), (UNAD), CEAD Ibagué, Colombia
Correo electrónico: paola.tenorio@unad.edu.co

Francisco José Montealegre Torres

Ingeniero Agrónomo de la Universidad del Tolima; Especialista en Gestión de Proyectos de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD; y Docente de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA), (UNAD), CEAD Ibagué, Colombia.
Correo electrónico: francisco.montealegre@unad.edu.co

Jeisson Tobías Rengifo Cuervo

Psicólogo y Magíster en Educación de la Universidad Surcolombiana; director del Centro de Investigación y Acción Psicosocial Comunitaria (CIAPSC) de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD.
Correo electrónico: jeisson.rengifo@unad.edu.co

Shyrley Rocío Vargas Paredes

Administradora de Empresas, Especialista en Gerencia Estratégica de Mercadeo y Magíster en Administración de Organizaciones de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD; Líder de Investigación Zona Sur de la UNAD.
Correo electrónico: shyrley.vargas@unad.edu.co

Katherine Rivera Quintero

Psicóloga de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD; Magíster en Neuropsicología Clínica de la Universidad Surcolombiana; Líder Local Centro de Investigación y Acción Psicosocial Comunitaria (CIAPSC), (UNAD).
Correo electrónico: katherine.rivera@unad.edu.co

Eliana Paola Rubio Portela

Ingeniera Ambiental egresada de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD, CEAD Ibagué, Colombia.
Correo electrónico: eprubiop@unadvirtual.edu.co

Yeimi Marcela Avilez Bedoya

Agrónoma egresada de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD), CEAD Ibagué, Colombia.
Correo electrónico: ymavilezb@unadvirtual.edu.co

Lina Gisselth Ospina Aguilar

Ingeniera Agroindustrial egresada de la Universidad del Cauca. Contratista UNAD - Proyecto de Investigación SGR: *Generación de valor agregado y adopción tecnológica para la transformación de los residuos del cultivo de plátano (Musa paradisiaca) en municipios del departamento del Tolima. Código BPIN: 2021000100302*.
Correo electrónico: linaagui@unicauca.edu.co

Juan Pablo Castañeda-Niño

Ingeniero Agroindustrial egresado de la Universidad del Cauca; Magíster en Ingeniería Área de Énfasis en Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle. Contratista UNAD - Proyecto de Investigación: SGR: *Generación de valor agregado y adopción tecnológica para la transformación de los residuos del cultivo de plátano (Musa paradisiaca) en municipios del departamento del Tolima. Código BPIN: 2021000100302*.
Correo electrónico: juan.castaneda.nino@correounivalle.edu.co

Yean Carlos Zapata-Diaz

Ingeniero Agroindustrial egresado de la Universidad del Cauca. Contratista UNAD - Proyecto de Investigación SGR: *Generación de valor agregado y adopción tecnológica para la transformación de los residuos del cultivo de plátano (Musa paradisiaca) en municipios del departamento del Tolima. Código BPIN: 2021000100302*.
Correo electrónico: yeanzapata@unicauca.edu.co

Margarita del Rosario Salazar-Sánchez

Bióloga, Magíster en Recursos Hidrobiológicos Continentales y Doctora en Ciencias Agrarias y Agroindustriales de la Universidad del Cauca. Contratista UNAD - Proyecto de Investigación SGR: *Generación de valor agregado y adopción tecnológica para la transformación de los residuos del cultivo de plátano (Musa paradisiaca) en municipios del departamento del Tolima. Código BPIN: 2021000100302*.
Correo electrónico: mdsalazar@unicauca.edu.co

Rosmery Carolina Imbachi-Hoyos

Ingeniera Agroindustrial egresada de la Universidad del Cauca. Contratista UNAD - Proyecto de Investigación SGR: *Generación de valor agregado y adopción tecnológica para la transformación de los residuos del cultivo de plátano (Musa paradisiaca) en municipios del departamento del Tolima. Código BPIN: 2021000100302*.

Correo electrónico: rosmeryimbachi@unicauca.edu.co

Contenido

RESEÑA DEL LIBRO 5
RESEÑA DE LOS AUTORES 7

CAPÍTULO 1

Metodologías para la evaluación de impacto ambiental y elaboración de línea base: estudio de caso del cultivo de plátano en el departamento del Tolima, Colombia 13

Introducción 15
Materiales y métodos 16
Resultados y discusión 31
Conclusiones 42
Referencias 44
Anexos 46

CAPÍTULO 2

Gestión psicosocial en la generación de valor agregado en el cultivo de plátano: abordaje desde la experiencia comunitaria 49

Introducción 50
Riesgos psicosociales de la agricultura en torno al cultivo de plátano 52
Gestión psicosocial 53
Psicología ambiental en la gestión psicosocial de platanicultores del Tolima 56
Consideraciones finales 58
Referencias 59

CAPÍTULO 3

Aprovechamiento integral de los subproductos del plátano para el desarrollo de materiales compuestos biobasados 65

Introducción 66
Aprovechamiento de subproductos provenientes del plátano 67
Metodologías requeridas para el desarrollo de almidón termoplástico (TPS) y material compuesto biobasado a partir de plátano 69
Caracterización fisicoquímica, tecno-funcional, térmica, estructural y mecánica de las materias primas provenientes del racimo y pseudotallo de plátano 72
Procesamiento para la obtención de materiales biobasados provenientes del plátano 74
Extracción de fibras lignocelulósicas y almidones según variedad y origen 76
Obtención de almidón termoplástico (TPS) a partir del plátano 99
Alternativas para el desarrollo de materiales compuestos biobasados 103
Conclusiones 107
Referencias 108

CAPÍTULO 4

Análisis de biodegradación de residuos de plátano: perspectivas y desafíos 121

Introducción 122
Composición celular de plátano 124
Composición química de los residuos de plátano 125
Metodologías para la evaluación de biodegradación 127
Factores que influyen en la biodegradación 131
Viabilidad Ambiental y potencial industrial 134
Conclusiones y perspectivas futuras 135
Referencias 136

CAPÍTULO 1.

METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL Y ELABORACIÓN DE LÍNEA BASE: ESTUDIO DE CASO DEL CULTIVO DE PLÁTANO EN EL DEPARTAMENTO DEL TOLIMA, COLOMBIA

Resumen

El cultivo de plátano (*Musa paradisiaca* L.) en Colombia representa una fuente importante de ingresos y seguridad alimentaria, siendo un componente fundamental de la dieta colombiana, contribuyendo significativamente a la nutrición y a la estabilidad socioeconómica. Sin embargo, la creciente expansión del cultivo de plátano en el departamento del Tolima ha subrayado la necesidad de implementar metodologías robustas para la evaluación de impacto ambiental (EIA) y la elaboración de líneas base.

Inicialmente, se realizó un análisis exhaustivo del área de estudio, incorporando datos geoespaciales, parámetros climáticos, y características edáficas. Se emplearon técnicas de georreferenciación y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para mapear la distribución y expansión del cultivo de plátano en la región. Simultáneamente, se recolectaron muestras de suelo y agua para evaluar la calidad y detectar posibles contaminantes derivados de prácticas agrícolas.

El marco metodológico adoptado incluyó una caracterización integral del suelo en Casabianca y Herveo mediante muestreo sistemático y análisis físico-químicos. La compactación del suelo se evaluó usando pruebas de penetración. Se analizaron muestras

de agua para determinar calidad y contaminantes. Se recopilaron datos climáticos locales evaluando condiciones de temperatura, precipitación y humedad. La determinación de ruido ambiental se llevó a cabo con sonómetros en puntos estratégicos. Se evaluó el medio biótico mediante inventarios de flora y fauna, identificando especies y su estado de conservación.

Los resultados revelaron que el cultivo de plátano en el departamento del Tolima tiene impactos significativos en la biodiversidad, la calidad del suelo y del agua, así como en los ciclos de nutrientes. Se observó una disminución en la diversidad de especies nativas y una degradación notable de la calidad del agua, atribuida principalmente al uso intensivo de agroquímicos. Además, la expansión del cultivo ha llevado a la deforestación y a la fragmentación del hábitat, afectando negativamente los servicios ecosistémicos.

En conclusión, este estudio destaca la importancia de utilizar metodologías integradas para la EIA y la elaboración de líneas base, proporcionando una herramienta esencial para la toma de decisiones ambientales informadas. La aplicación de estas metodologías en el cultivo de plátano en el departamento del Tolima no solo permite identificar y mitigar impactos ambientales, sino que también promueve prácticas agrícolas sostenibles que pueden ser replicadas en otras regiones agrícolas de Colombia y el mundo.

Palabras clave: sostenibilidad agrícola; *Musa paradisiaca* L; conservación de ecosistemas; gestión ambiental

Abstract

Plantain (*Musa paradisiaca* L.) cultivation in Colombia represents an important source of income and food security, being a fundamental component of the Colombian diet, contributing significantly to nutrition and socioeconomic stability. However, the increasing expansion of plantain cultivation in the department of Tolima has highlighted the need to implement robust methodologies for environmental impact assessment (EIA) and the development of baselines. This case study presents a comprehensive approach to assess the environmental impacts associated with plantain cultivation, using a combination of quantitative and qualitative methods.

Initially, a comprehensive analysis of the study area was conducted, incorporating geospatial data, climatic parameters, and edaphic characteristics. Georeferencing techniques and Geographic Information Systems (GIS) were used to map the distribution and expansion of plantain cultivation in the region. Simultaneously, soil and water samples were collected to evaluate the quality and detect possible contaminants derived from agricultural practices.

The methodological framework adopted included an integral characterization of the soil in Casabianca and Herveo through systematic sampling and physical-chemical analysis. Soil compaction was evaluated using penetration tests. Water samples were analyzed for water quality and contaminants. Local climatic data were collected to evaluate temperature, precipitation and humidity conditions. Environmental noise was determined using sound level meters at strategic points. The biotic environment was evaluated through flora and fauna inventories, identifying species and their conservation status.

The results revealed that plantain cultivation in Tolima has significant impacts on biodiversity, soil and water quality, and nutrient cycles. A decrease in the diversity of native species and a notable degradation of water quality were observed, mainly attributed to the intensive use of agrochemicals. In addition, the expansion of cultivation has led to deforestation and habitat fragmentation, negatively affecting ecosystem services.

In conclusion, this study highlights the importance of using integrated methodologies for EIA and baseline development, providing an essential tool for informed environmental decision-making. The application of these methodologies in plantain cultivation in Tolima not only allows identifying and mitigating environmental impacts but also promotes sustainable agricultural practices that can be replicated in other agricultural regions of Colombia and the world.

Keywords: Agricultural Sustainability; *Musa Paradisiaca L*; Ecosystem Conservation; Environmental Management

Introducción

En el cultivo de plátano, el uso masivo de abonos químicos, plásticos y pesticidas, junto con las condiciones agroecológicas y la presencia de áreas de ladera con suelos deteriorados, puede provocar cambios drásticos en el medio ambiente asociado a esta actividad agrícola. En el presente capítulo se describen estos componentes tanto bióticos como abióticos que llegan a generar impactos ambientales en el cultivo de plátano en predios del norte del departamento del Tolima, específicamente en los municipios de Casabianca y Herveo. Así pues, en este estudio de caso se ha tratado de reconocer cada componente ambiental y productivo evaluándolos a partir de la recolección de datos y levantamiento de una línea base y poder luego establecer el impacto generado en ellos por el hombre y sus prácticas de cultivo.

La evaluación de Impacto Ambiental o "EIA" es una herramienta que permite la identificación y valoración de los posibles impactos ambientales que los proyectos pueden

llegar a generar, con la finalidad de evaluar y diseñar medidas adecuadas de prevención, mitigación, gestión y monitoreo (FAO, 2012) pero requiere antes recolectar los componentes involucrados en una primera evaluación ambiental.

La base de datos ambientales incluyó una descripción completa y detallada de las condiciones ambientales actuales en el área del proyecto propuesto. Contiene datos sobre la calidad del aire, el agua y el suelo, la biodiversidad, el clima, la geología, el uso de la tierra y aspectos socioeconómicos y culturales. Adicionalmente se usó Evaluación Ecológica Rápida (EER) propuesta por *The Nature Conservancy* (1992) para determinar el medio biótico. El propósito de la línea de base desarrollada es proporcionar información básica para medir los cambios ambientales de la producción agrícola del cultivo de plátano.

El estudio del caso aplicado a la producción de plátano identifica los aspectos ambientales involucrados desde una línea base o de partida que concientice los productores para que mitiguen o eliminen algunos residuos contaminantes pero que igualmente los ubique en que existe un potencial de residuos de poscosecha que pueden ser convertidos en recipientes para alimentos con la característica de ser biodegradables y además conozcan mejor los suelos, biodiversidad y características socioeconómicas en donde ellos realizan la actividad productiva.

Materiales y métodos

La evaluación ambiental se aplicó en los predios de los beneficiarios del proyecto denominado “Generación de valor agregado y adopción tecnológica para la transformación de los residuos del cultivo de plátano (*Musa paradisiaca* L.) en municipios del departamento del Tolima código BPIN 2021000100302” con recursos del Sistema General de Regalías (SGR). Para ello y tomando una línea base, como punto de partida, del total de los beneficiarios del proyecto, se usó una submuestra, donde se seleccionaron las fincas en los municipios de Casabianca y Herveo, se seleccionó un subconjunto aleatorio de individuos de la población objetivo para representar a todo el grupo. (Muguira, A., 2024), se identificaron 15 fincas del municipio de Casabianca y 15 fincas del municipio de Herveo poblaciones del norte del Tolima en Colombia, se establecieron los parámetros ambientales para el diagnóstico ambiental a través de análisis del clima, determinación del ruido, análisis de agua, edafología y medio biótico.

Durante 12 meses, se realizaron estudios en las veredas el Lembo, Graciela, Llanadas y Yumba, del municipio de Casabianca y la Esperanza, Águila, Yerbal y Plan, del municipio de Herveo, donde se usaron los siguientes métodos empleados en campo, evaluando los impactos de las prácticas agrícolas del cultivo del plátano: para el componente suelo se realizó una caracterización compuesta por pruebas organolépticas, perfil del

suelo, grado de pendiente, compactación del suelo, color y toma de muestra de suelo para luego analizarlo, y también para determinar ruido con sonómetro, la toma de muestra de agua en puntos equidistantes de influencia de la red hídrica en los municipios y análisis de laboratorio. Para analizar el clima se instalaron dos estaciones meteorológicas, una en cada municipio donde se registraron datos de viento, precipitación, radiación y humedad relativa, entre otros. La prueba en campo se llevó a cabo utilizando herramientas artesanales como el agro-nivel, un instrumento que permite calcular el porcentaje de inclinación de cada predio. Para ello, se tomaron aproximadamente ocho puntos de referencia, comenzando desde la parte alta del cultivo.

A continuación, se presentan los equipos usados en campo para las diferentes mediciones:

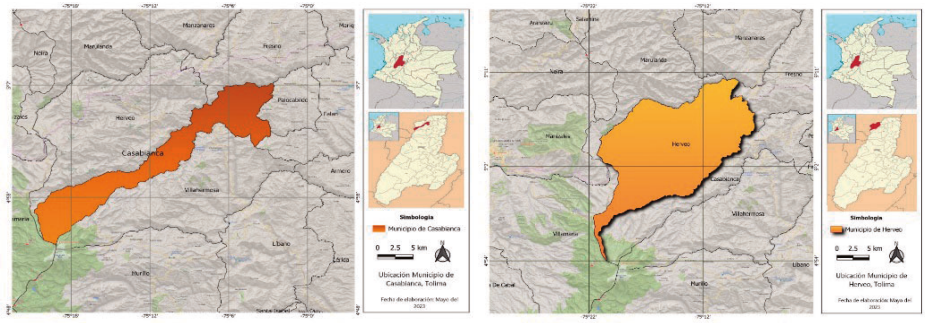
- Agronivel artesanal
- Penetrólogger de marca Eijerkamp soil & water
- Equipo meteorológico de marca AcuRite Iris (5 in 1) Weather Station with weather ticker display and lightning detection models 010222, 02080, 06046
- GPS MobileMapper 50 Spectra
- Sonómetro marca Sound Level Data Logger, referencia IEC61672-1 CLASS2

Área de estudio

Los municipios objeto de estudio se destacan por la topografía del terreno. El municipio de Casabianca en su mayor parte es montañosa y corresponde a la cordillera central, en donde se destacan el nevado del Ruiz y los altos Chagual. Sus tierras se distribuyen entre los climas templados y frío, la temperatura promedio anual es de 17,8°C aproximadamente, siendo marzo el mes de mayor temperatura y diciembre el de menor; en su jurisdicción se encuentra el Parque Nacional Natural Los Nevados (IGAC, 2023). Para el municipio de Herveo, sus tierras se distribuyen entre los climas templado y frío, la temperatura promedio anual es de 16,1°C, siendo mayo el mes de mayor temperatura y octubre el de menor. En su jurisdicción se encuentra el Parque Nacional Natural Los Nevados (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2023).

Se utilizaron diferentes métodos en campo para la toma de las muestras correspondientes en el levantamiento de la línea base ambiental; a continuación, se describen las metodologías para cada uno de los componentes estudiados.

Figura 1. Mapa de localización de municipios de Casabianca y Herveo, Tolima



Fuente: elaboración propia

Caracterización de suelos en las zonas rurales de Casabianca y Herveo

Pruebas organolépticas

Textura: de acuerdo con el manual de campo Araujo et al., (2023) este componente se refiere a la distribución de las partículas minerales, que componen el suelo, los cuales son arena, limo y arcilla. Su importancia refleja las características que tiene el mismo, con respecto a distintos procesos esenciales para la fertilidad y por ende el uso en cultivos, factores como la capacidad de almacenamiento de agua, aireación, dependen de estos elementos (Araujo et al., 2023).

Para estudiar la textura, se realizaron pruebas organolépticas con el objetivo de evaluar las características del predio mediante el tacto y la visión. Se identificó la consistencia del suelo en campo, siguiendo la metodología de Vargas et al., (2020). Según estos autores, la arena presenta una textura granulosa y áspera al tacto, sin dejar material fino en las líneas de la palma. El limo, en cambio, tiene una consistencia harinosa, similar al polvo de talco, sin granos perceptibles de arena. Por su parte, la arcilla es moldeable, de alta plasticidad y peso, con una textura ligeramente jabonosa, aunque requiere aplicar cierta fuerza en los dedos para su manipulación y amasado. Para determinar el tipo de textura del suelo en campo, es fundamental emplear herramientas que permitan obtener resultados precisos. Para ello, se utiliza el triángulo de textura, una guía que clasifica los suelos en 12 clases texturales según el sistema propuesto por la USDA (Echeverria et al., 2023).

Otra de las pruebas realizadas fue la de lavado de manos, la cual consiste en tomar una muestra de suelo húmeda y frotarla entre las manos. Si las partículas se sienten claramente, indica que el suelo es arenoso. Si la muestra es pegajosa, pero las manos

pueden limpiarse al frotarlas una vez secas, se trata de un suelo limoso. En el caso de la arcilla, esta se siente pegajosa y requiere agua para removerse completamente de las manos (Pahaut et al., 2020).

***Perfil del suelo* (*Posición e identificación de horizontes*):** el perfil del suelo hace referencia a las capas llamadas horizontes, las cuales se revelan cuando se forma el suelo; esto quiere decir que representan la capa superior, el subsuelo y otros horizontes (Vargas et al., 2020), de acuerdo con esto, podemos encontrar los tipos de Horizontes.

Horizonte O: es la capa de hojarasca sobre la superficie del suelo suele encontrarse en bosques o forestales, además no saturados por agua, por periodos prolongados.

Horizonte A: presenta un color negruzco, debido a la cantidad de materia orgánica, por lo que contiene humus, este tipo de horizontes según en Echevarría et al., (2023) se encuentran las "partículas de limo, arena y arcilla" p 53.

Horizonte B: las sales minerales vienen disueltas provenientes del horizonte A, por lo que también este tipo de horizonte presenta acumulación de arcilla (Echevarría et al., 2023) además presenta colores más fuertes (croma alto y/o matiz rojizo).

Horizonte C: formado por la roca madre en proceso de meteorización.

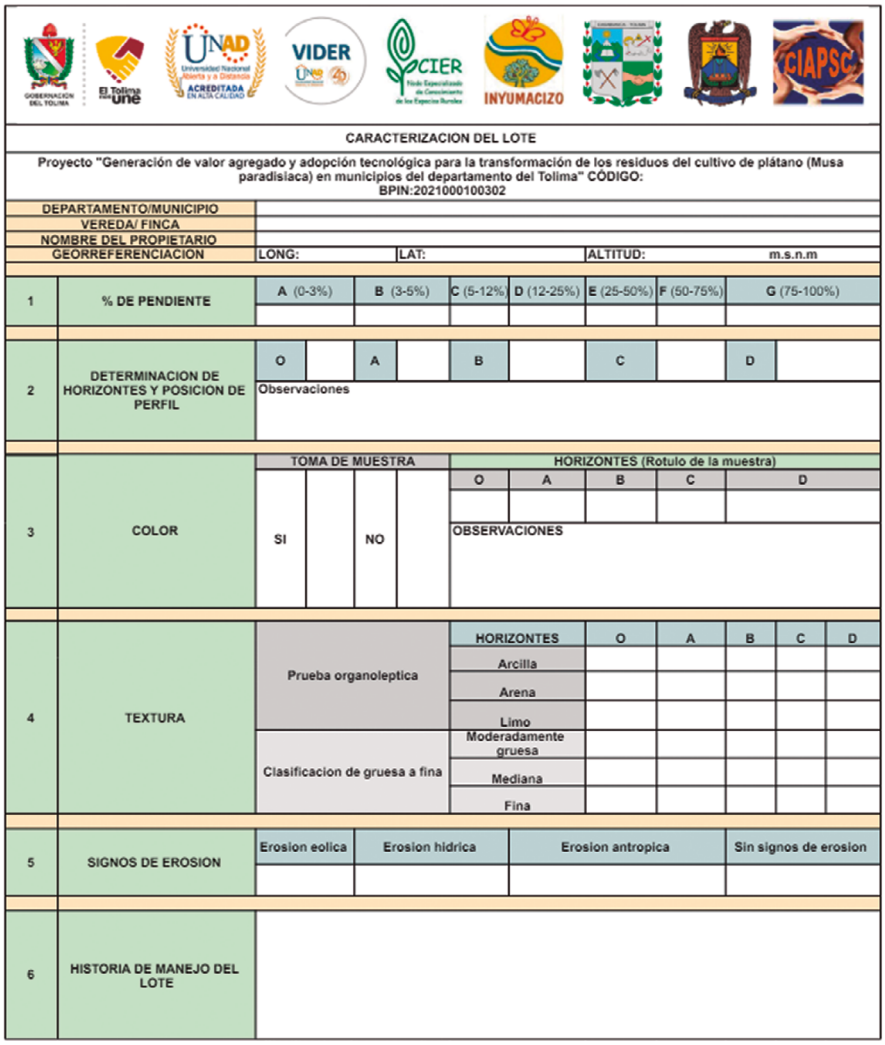
Horizonte D: es donde se presenta la Roca madre, roca dura o lecho rocoso, llamado comúnmente (Vargas et al., 2020).

Para observar los horizontes del suelo en las fincas evaluadas, es necesario identificar los perfiles edáficos. Para ello, se realizan calicatas, las cuales, según Monserrate y Vera (2023), constituyen el método adecuado para determinar la presencia de horizontes, examinar su disposición y evaluar posibles alteraciones causadas por procesos de remoción en masa.

Color: otro factor importante en el estudio del suelo es el color, formado por tres variables, que son matiz, luminosidad e intensidad. Para su clasificación se emplea la tabla de Munsell, que consiste en medir las respectivas tonalidades del suelo (Monserrate y Vera, 2023).

Para el presente estudio se realizaron pruebas organolépticas de observación en campo, mediante las cuales se determinaron las tonalidades de los horizontes identificados para conocer sus características. Se observó que los suelos con colores claros y brillantes indican baja fertilidad, mientras que aquellos con tonalidades verde oliva o café oscuro presentan un mayor índice de fertilidad (Pahaut et al., 2020). Además, para la aplicación de estas pruebas organolépticas, se diseñó un formato que permitió identificar y registrar las características observadas en campo.

Figura 2. Formato de caracterización de pruebas organolépticas de suelo



CARACTERIZACION DEL LOTE													
Proyecto "Generación de valor agregado y adopción tecnológica para la transformación de los residuos del cultivo de plátano (Musa paradisiaca) en municipios del departamento del Tolima" CÓDIGO: BPIN:2021000100302													
DEPARTAMENTO/MUNICIPIO													
VEREDA/ FINCA													
NOMBRE DEL PROPIETARIO													
GEORREFERENCIACION	LONG:			LAT:				ALTITUD:			m.s.n.m		
1	% DE PENDIENTE	A (0-3%)		B (3-5%)		C (5-12%)	D (12-25%)	E (25-50%)		F (50-75%)	G (75-100%)		
2	DETERMINACION DE HORIZONTES Y POSICION DE PERFIL	O		A		B		C		D			
		Observaciones											
3	COLOR	TOMA DE MUESTRA				HORIZONTES (Rotulo de la muestra)							
		SI		NO		O	A	B	C	D			
						OBSERVACIONES							
4	TEXTURA	Prueba organoleptica				HORIZONTES	O	A	B	C	D		
						Arcilla							
						Arena							
						Limo							
		Clasificacion de gruesa a fina				Moderadamente gruesa							
						Mediana							
						Fina							
5	SIGNOS DE EROSION	Erosion eolica		Erosion hidrica		Erosion antropica				Sin signos de erosion			
6	HISTORIA DE MANEJO DEL LOTE												

Fuente: elaboración propia

Pruebas de pendiente del terreno: la pendiente hace referencia al grado de inclinación o desnivel de un terreno con respecto a la horizontal. Este factor es de gran importancia en la agricultura, ya que, según el IGAC (2021), influye en la escorrentía, el drenaje natural, la infiltración, la clase y grado de erosión, así como en el uso y manejo de los suelos (p. 15).

Para el estudio de la pendiente y la determinación del porcentaje de inclinación en los terrenos de las fincas ubicadas en los municipios de Casabianca y Herveo, se tomó como referencia la siguiente tabla de clasificación:

Tabla 1. Clasificación de la pendiente según la inclinación del terreno.

Símbolo	Gradiente %	Descripción
a	0-3	Plano
b	3-7	Ligeramente inclinado
c	7-12	Moderadamente inclinado
d	12-25	Fuertemente inclinado
e	25-50	Ligeramente escarpado
f	50-75	Moderadamente escarpado
g	>75	Fuertemente escarpado

Fuente: IGAC (2021)

Figura 3. Construcción de agronivel

Fuente: elaboración propia

El agronivel permitió determinar el grado de inclinación del terreno en los municipios, identificando los porcentajes de pendiente de cada finca. Estos datos son fundamentales para la elaboración de un plan de contingencia, ya que la pendiente es un factor crítico en la ocurrencia de deslizamientos de tierra y procesos erosivos. Su análisis es esencial para la gestión de los cultivos en la zona, particularmente el plátano, cuya siembra en terrenos inclinados requiere estrategias de manejo adecuadas.

Compactación de suelo

Para la medición para la compactación de suelos se usó del equipo llamado penetrómetro (Eijkelkamp soil & Water), el cual permite hacer el procedimiento, brindando unos resultados para el análisis de los predios de las fincas a evaluar.

Figura 4. Equipo Penetrómetro (Eijkelkamp soil & Water)

Fuente: elaboración propia

Se realizaron mediciones en las fincas seleccionadas, tomando puntos estratégicos tanto dentro como fuera del lote de cultivo. La frecuencia de medición se estableció en función de la variabilidad del terreno, asegurando una distribución representativa de los datos. Se registraron mediciones a diferentes distancias de las plantas, considerando su influencia en la compactación del suelo y la disponibilidad de agua y nutrientes.

Los datos obtenidos permitieron caracterizar las condiciones del suelo y determinar factores que podrían influir en el bajo rendimiento del cultivo de plátano, objeto de esta investigación.

Análisis fisicoquímico de suelos

Otra de las actividades fundamentales para el estudio de los terrenos en los municipios de Casabianca y Herveo fue el análisis fisicoquímico de los suelos, una herramienta clave para comprender en detalle sus propiedades. Para esta actividad se implementó un procedimiento adecuado y se utilizaron las herramientas necesarias para garantizar la precisión del análisis.

Los implementos necesarios para tomar muestras de suelo en campo son barrenos, que son de fácil manejo, y permiten una toma rápida de la muestra, un valde limpio, guantes de látex, porque es fundamental no contaminar la muestra, bolsas plásticas donde se deposita el material recolectado, si no contamos con un barreno, podremos utilizar como medio de recolección una pala y un machete, para cortar la muestra recolectada.

Puntos estratégicos para la toma de muestras de suelo: al identificar el terreno a evaluar, en este caso, los predios de las fincas de los municipios de Casabianca y Herveo, se determinó un recorrido en zigzag. Este tipo de trayecto permite abarcar toda el área de estudio. La distancia entre cada punto de recolección debe ser, al menos, de 5 metros (Araujo et al., 2023) para garantizar una muestra representativa. Se pueden tomar de 5 a 10 submuestras (Duarte y Montaño, 2020), o incluso más. En el caso de las fincas de estudio, se tomaron 15 submuestras por cada predio con el objetivo de obtener un diagnóstico más preciso de las características del suelo. La profundidad recomendada para la toma de muestras es de 20 a 30 cm (Duarte y Montaño, 2020).

Cada submuestra debe ser colocada en un balde y homogenizada antes de aplicar el método de cuarteo de suelo. Este proceso permite reducir el volumen de la muestra a un tamaño adecuado para depositarla en una bolsa plástica de 1 kg (Duarte y Montaño, 2020). Es fundamental etiquetar cada muestra con los datos específicos del productor, las coordenadas y las características de las fincas.

Al realizar las recolecciones de muestras en campo, es esencial evitar tomar muestras en lugares fertilizados, caminos del cultivo, bordes del terreno, zonas erosionadas (Araujo et al., 2023), o en sitios con mal drenaje.

Figura 5. Recolección de muestras de suelos

Fuente: elaboración propia

Recurso hídrico

Preservar la productividad y la salud del ecosistema en agricultura esencial al manejar el agua de forma adecuada. De acuerdo con la FAO (2011), se puede mejorar la eficiencia

del riego, disminuir la contaminación y preservar los recursos hídricos para las futuras generaciones mediante una gestión sostenible del agua. Según el informe de la FAO, el manejo inadecuado del agua puede degradar el suelo, salinizar y contaminar fuentes hídricas, lo que impacta negativamente a las comunidades agrícolas (FAO, 2011). El enfoque del análisis de agua es asegurar un uso sostenible y equitativo del recurso, no solo en términos de calidad sino también de cantidad disponible (Molden, 2007).

Los municipios de Casabianca y Herveo en el departamento del Tolima tienen una dependencia significativa del cultivo de plátano, lo que requiere una gestión mejorada de los recursos hídricos en estas áreas. El análisis del agua en estos municipios proporciona una evaluación ambiental detallada de la calidad y disponibilidad del recurso hídrico y establece una línea base esencial para futuros estudios y proyectos de intervención. Estudios han demostrado que la calidad del agua afecta directamente la productividad agrícola y la salud pública. Por ejemplo, la contaminación del agua por nitratos, fosfatos y patógenos puede reducir el rendimiento de los cultivos y causar enfermedades en humanos y animales (Nolan et al., 2002; WHO, 2017).

El análisis del agua es un componente esencial en la evaluación del impacto ambiental, especialmente en el sector agrícola, donde su disponibilidad y calidad influyen directamente en el desarrollo de los cultivos y otras actividades agropecuarias. En los municipios de Casabianca y Herveo, en el departamento del Tolima, se diseñó una metodología integral para caracterizar la calidad del agua, estableciendo una línea base que permitirá futuras comparaciones y la implementación de estrategias de manejo sostenible.

Identificación y descripción de condiciones hidrológicas

La identificación y descripción de las condiciones superficiales y la distribución hidrológica se llevaron a cabo mediante una revisión bibliográfica exhaustiva de fuentes secundarias. Se utilizó información del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca (POMCA) del río Gualí, disponible en la página web de la Corporación Autónoma Regional de Tolima (CORTOLIMA). Esta información permitió identificar las cuencas, subcuencas y microcuencas relevantes para los municipios de Casabianca y Herveo (CORTOLIMA, 2015).

Delimitación de la cuenca

La delimitación de la cuenca se realizó utilizando operaciones de geoprocesamiento en el *software* ESRI ArcGIS 10.5, empleando el módulo ArcHydro Tools. El proceso incluyó las siguientes etapas:

1. Relleno de fallas del modelo digital de elevación (MDE): para corregir valores nulos y zonas muertas de flujo.

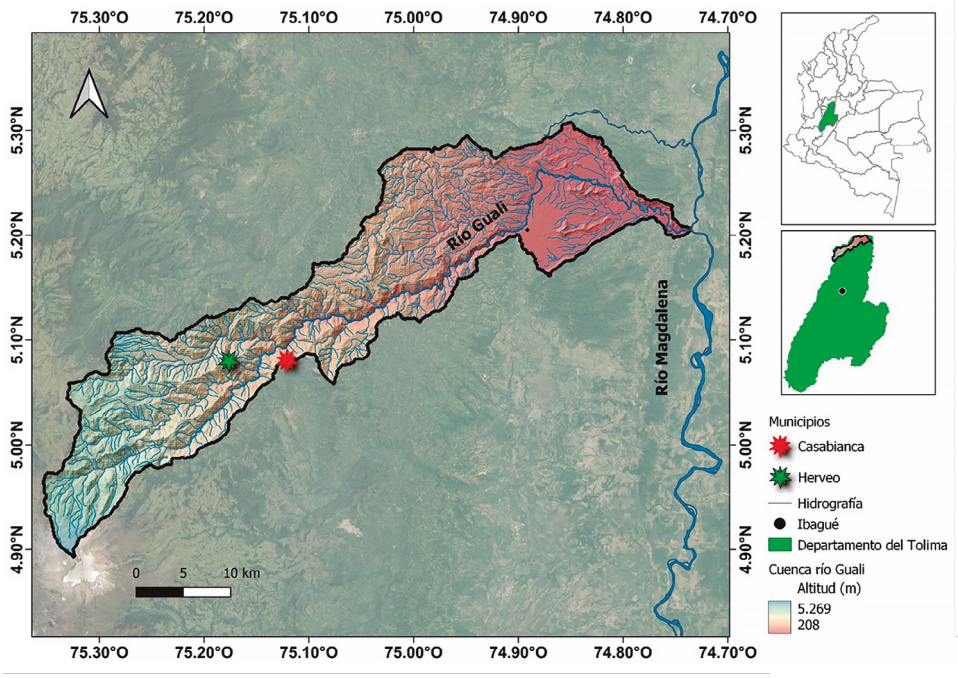
2. Determinación de la dirección de flujo: para estimar el camino más probable para la red de drenaje, basado en la declividad.

3. Mapeo del flujo acumulado: determinando la cantidad de píxeles que drenan a través de cada píxel, permitiendo definir el área drenada.

4. Definición del área de drenaje y red de drenaje: utilizando los mapas generados en los pasos anteriores (Farr et al., 2007).

Los resultados mostraron que el área de la cuenca del río Gualí es de 788.7 km^2, con un perímetro de 279.01 km y una altitud que varía entre 207.59 y 5269.7 metros sobre el nivel del mar (CORTOLIMA, 2015).

Figura 6. Área de estudio mostrando los municipios de Herveo y Casabianca, departamento del Tolima dentro de la cuenca del río Gualí.



Fuente: elaboración propia

Georreferenciación de fincas

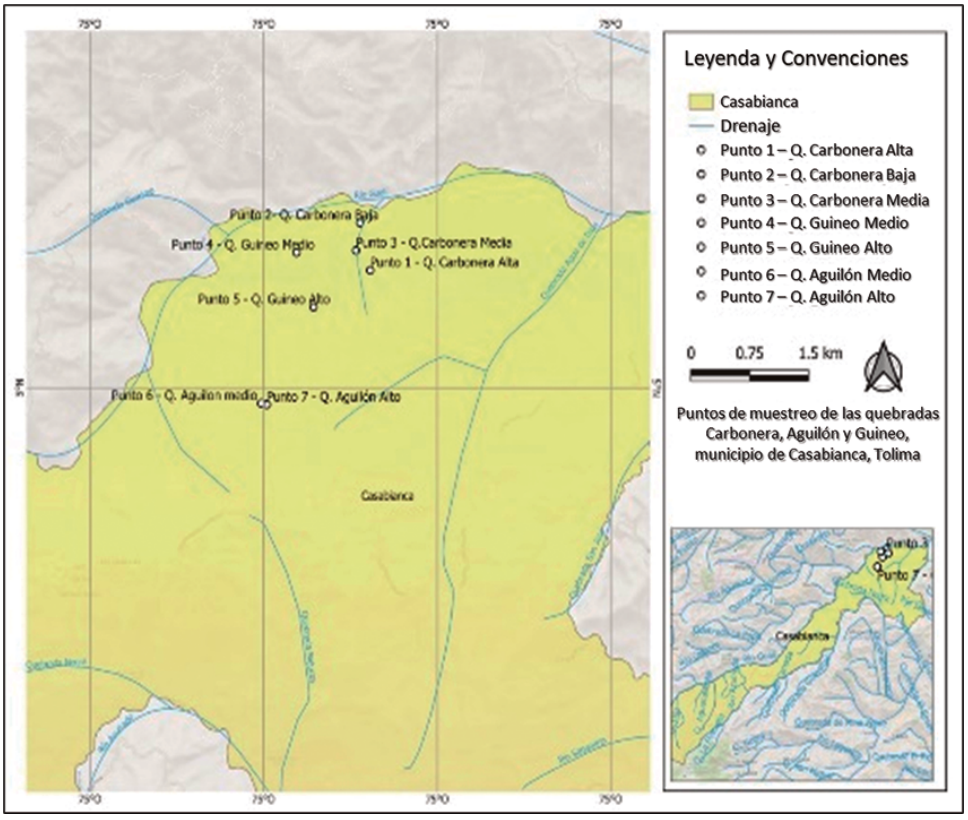
La georreferenciación de las fincas beneficiarias se realizó mediante el uso de GPS para registrar las coordenadas geográficas de cada finca. En total, se georreferenciaron 15

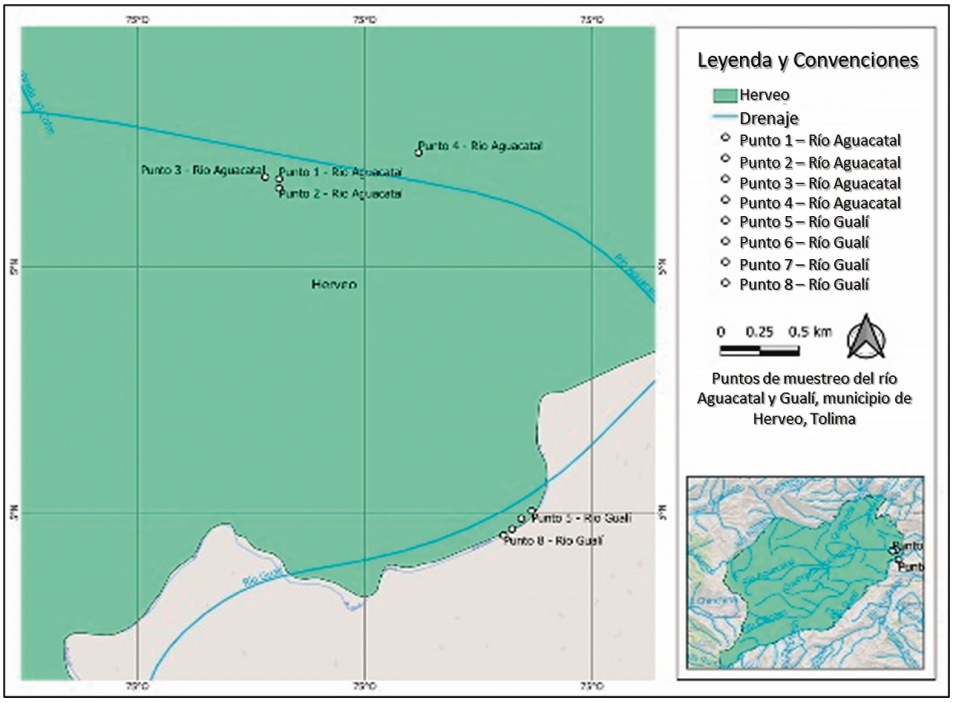
fincas en Casabianca y 15 en Herveo. Esta información se visualizó en mapas utilizando Google Earth, permitiendo ubicar espacialmente cada finca en relación con las fuentes hídricas de la zona.

Recolección y análisis de muestras de agua

Para evaluar la calidad del agua superficial, se seleccionaron 15 puntos de muestreo, siete en Casabianca y ocho en Herveo. Las muestras de agua se recolectaron de fuentes hídricas como los ríos Aguacatal y Gualí, y las quebradas Carbonera, Aguilón y Guineo. Los análisis se realizaron en el laboratorio AMBILAB, evaluando parámetros fisicoquímicos como pH, conductividad, nitratos, fosfatos, y microbiológicos como coliformes totales y *E. coli.*

Figura 7. Localización de los puntos de muestreo en las quebradas Carbonera, Aguilón, Guineo de Casabianca y Río Aguacatal, Río Gualí, Herveo-Tolima





Fuente: elaboración propia

Condiciones climáticas

Este apartado analiza el impacto de las condiciones climáticas en el proyecto de investigación "Generación de valor agregado y adopción tecnológica para la transformación de los residuos del cultivo de plátano (*Musa paradisiaca* L.) en municipios del departamento del Tolima".

El estudio se fundamenta en la recopilación de datos de estaciones meteorológicas para comprender las condiciones climáticas de la región. Se evalúa la importancia agrícola y la necesidad de adaptarse al clima para mejorar la productividad y sostenibilidad local utilizando datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2020) y estaciones instaladas en puntos estratégicos de Casabianca y Herveo. El IDEAM suministra información pasada y presente que posibilita la comparación y el análisis a largo plazo de las variables climáticas. Las mediciones locales realizadas en las fincas complementan la visión detallada de las condiciones específicas.

Estas fuentes combinadas permiten un análisis sólido, abarcando tanto las tendencias macroclimáticas como las microclimáticas que impactan la actividad agrícola y la vida cotidiana en Casabianca y Herveo. Se presentan aquí los métodos de recopilación de datos, análisis realizados y resultados obtenidos que se centran en variables como la

temperatura, precipitación, humedad y viento. El estudio establece una línea base climática esencial para investigaciones futuras y proporciona información clave para la gestión de recursos naturales y la planificación agrícola, particularmente en relación con el cultivo de plátano en la región del Tolima.

Figura 8. Estaciones meteorológicas ubicadas en los municipios de Casabianca y Herveo, Tolima

Fuente: elaboración propia

Se instalaron dos estaciones meteorológicas en Casabianca y Herveo (una en cada municipio) para proporcionar datos precisos y continuos, lo que facilita un análisis exhaustivo de las variables climáticas. La recopilación de datos se realizó de manera sistemática, utilizando equipos calibrados y procedimientos estandarizados para garantizar la precisión y confiabilidad de las mediciones.

Figura 9. Instalación de las estaciones en las fincas seleccionadas para el estudio de las variables meteorológicas

Fuente: elaboración propia

Humedad relativa y temperatura: la humedad relativa tiene una influencia crítica en el crecimiento de los cultivos, especialmente del plátano, y la aparición de enfermedades. A

su vez, la temperatura tiene un impacto directo en el ciclo de vida del plátano. El cultivo de plátano alcanza su óptimo crecimiento y producción a una temperatura entre 26°C y 30°C. Temperaturas que no estén dentro de este rango pueden tener consecuencias negativas; en particular, temperaturas inferiores a 14°C o superiores a 38°C pueden ocasionar daños importantes a la planta.

En Herveo, de acuerdo con las mediciones realizadas, se cuenta con un mínimo de 14°C y un máximo de 22°C, mientras que en Casabianca las temperaturas oscilan entre 15°C y 23°C. La humedad relativa en ambos municipios muestra una considerable variabilidad: durante la mayor parte del año, la humedad máxima se mantiene alta entre 80% y 100%, a pesar de las fluctuaciones significativas de la humedad mínima. El clima tropical de montaña en la región andina de Colombia produce estas condiciones, las cuales impactan los ciclos de crecimiento y descomposición de residuos agrícolas (IDEAM, 2023).

Precipitación y presión atmosférica: la precipitación es un factor clave para la disponibilidad de agua y el desarrollo de los cultivos. Los datos recopilados indican que Casabianca recibe un promedio anual de 1 500 mm de lluvia, mientras que Herveo alcanza los 1 800 mm. En comparación, el IDEAM (2020) reporta una precipitación promedio regional de 1 650 mm. Las variaciones en la precipitación pueden afectar la planificación de cultivos y la gestión del agua en las fincas. El análisis de las gráficas de precipitación y presión atmosférica revela un patrón de precipitación bimodal en ambos municipios. En octubre, se observa un aumento significativo en las lluvias de Herveo, mientras que en Casabianca ocurre un incremento similar en la misma semana. Esto sugiere que octubre será un mes de fuertes precipitaciones en ambos municipios. Por otro lado, la presión atmosférica se mantiene constante en 30 mm Hg, lo cual es característico de las regiones montañosas (IDEAM, 2023).

Velocidad del viento: en ambos municipios se observan cambios importantes en la velocidad del viento. En Herveo, el viento puede alcanzar a 12 km/h en octubre. En Casabianca se alcanzan picos más altos de hasta 25 km/h en julio del 2023. En estas regiones, la velocidad fluctuante del viento puede afectar tanto a la dispersión de esporas y semillas como al proceso de secado de residuos agrícolas. Estos factores son fundamentales para el manejo adecuado del cultivo de plátano.

La velocidad del viento impacta en la evapotranspiración y la dispersión de plagas (Raju et al., 2024). En Casabianca, la velocidad del viento promedio es de 3 m/s, y en Herveo es de 2.5 m/s. El IDEAM registra una velocidad del viento regional promedio de 2.8 m/s (IDEAM, 2020). Estos datos ayudan a diseñar prácticas agrícolas que minimicen la erosión del suelo y optimicen el uso del agua.

Vegetación y fauna: el estudio del componente biótico para ambos municipios se realizó mediante una caracterización vegetal, con base en la metodología de la Evaluación

Ecológica Rápida (EER) propuesta por Sayre et al. (2002). Para la toma de la información se usó como herramienta un formato, donde se registraron los datos a partir de las observaciones en campo y la información brindada por cada uno de los beneficiarios de las fincas, de acuerdo con las características biológicas de flora y fauna de sus predios.

Se empleó el formulario de Evaluación Ecológica Rápida (EER) la cual permitió condesar información con respecto a las características topográficas, como la pendiente general, sistema ecológico, fisionomía, así como también características frente a las especies de plantas dominantes, como la descripción de su nombre común como científico, también presente información del estado de estrato ecológico de las especies de vegetales; finalmente se describen con nombre común y científico las especies de fauna, tanto domésticas como silvestres, en las fincas objeto de estudio. La finalidad del diligenciamiento de formulario permitió tener un panorama más amplio con respecto al proceso de la caracterización vegetal y animal del área de influencia del proyecto.

Teniendo presentes las regiones donde se ejecuta el siguiente proyecto, se resalta la importancia de las características fisiográficas, partiendo de la alta influencia de ambos municipios con el volcán Nevado de Ruiz. La topografía del municipio de Casabianca es montañosa en su mayor parte y corresponde a la cordillera Central en donde se destacan los altos de Chagual, Oromazo, Palmas, Real y San Vicente; sus tierras se distribuyen entre los climas templado a frío y la temperatura promedio anual es de 17,8°C aproximadamente. El municipio de Herveo, igualmente montañoso, corresponde a la cordillera central, en donde se destacan los cerros de El Bosque, La Perdida y Morrón, y el alto Cerro Bravo, entre otros, sus tierras se distribuyen entre climas templado y frío, la temperatura promedio anual es de 16,1°C (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2023).

Figura 9. Trabajo de campo con las comunidades

Fuente: elaboración propia

El proceso de caracterización de la vegetación y la fauna incluyó la recopilación de información sobre los distintos tipos de cultivos presentes en el área, desde cultivos semestrales hasta permanentes. Entre estos se encuentran maíz, yuca, frutales, gramíneas, plátano y café, los cuales desempeñan un papel fundamental tanto en la economía local como en el sustento de la comunidad.

Determinación de ruido

Para la toma de los registros de ruido, se consideró la definición del Observatorio Ambiental de Bogotá, según la cual el ruido ambiental es la sumatoria de todas las fuentes emisoras de sonido (Camelo, 2021). Estas pueden ser fuentes fijas, derivadas de actividades económicas que trascienden al exterior, o fuentes móviles, como el flujo vehicular, el sobrevuelo de aeronaves y otras actividades humanas en espacios públicos.

Se determinaron 4 puntos, divididos así: punto 1: se refiere al borde de la carretera del predio o caminos dirigidos al cultivo o a la vivienda; puntos 2 y 3: cultivo en dos extremos diferentes del predio; y punto 4: vivienda del predio. Así mismo, se tuvo presente la Resolución 0627 de 2006 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que es la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental, por la que determina las normas ambientales mínimas y las regulaciones generales aplicables a las actividades que puedan producir daños ambientales de manera directa o indirecta y dictar regulaciones generales para controlar y reducir la contaminación atmosférica en el territorio nacional, con la finalidad de comparar los resultados obtenidos con los propuestos en la normativa.

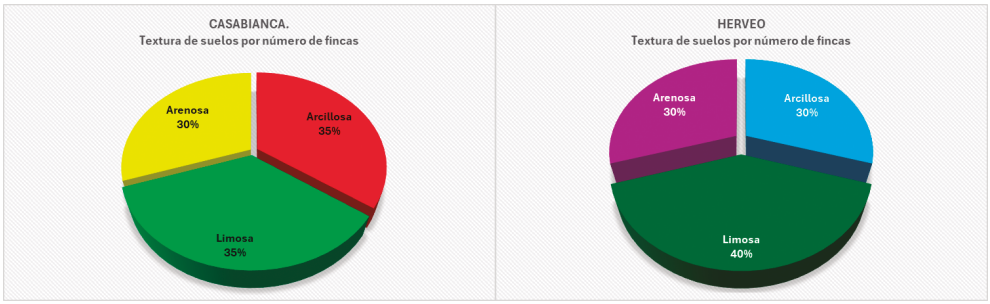
Resultados y discusión

Edafología y fertilidad del suelo

Pruebas organolépticas (Textura, color, perfil del suelo)

En la identificación de las características presentadas en los suelos de los predios de los municipios de Casabianca y Herveo, se encontraron los siguientes resultados según las pruebas organolépticas realizadas en la zona, donde se pretendía observar las cualidades detectadas allí.

Figura 10. Identificación de textura arcillosa, limosa y arenosa



Fuente: elaboración propia

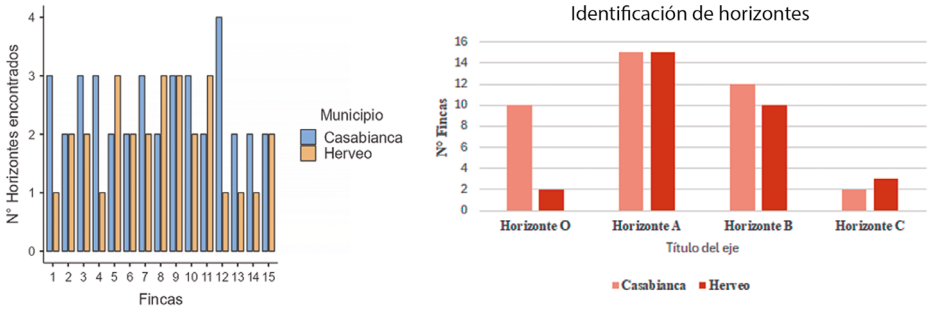
Se puede observar en las fincas donde se realizó una exploración de los predios seleccionados aleatoriamente, la textura, determinada mediante el tacto, donde en el municipio de Casabianca se identificaron más fincas con texturas arcillosas y limosas, mientras en Herveo con textura limosa. Estos cálculos proporcionan una visión general de cómo se distribuyen las diferentes texturas del suelo en los municipios de investigación y a su vez nos brindan aspectos clave, que permiten detectar condiciones del terreno para el cultivo del plátano.

Perfil del suelo

Figura 11. Horizontes, posición y color del suelo

Fuente: elaboración propia

Figura 12. Número e identificación de horizontes



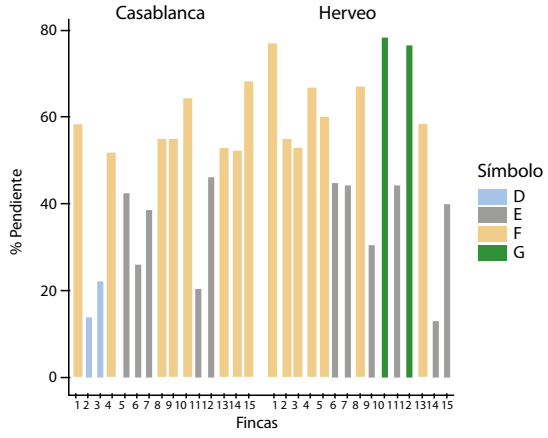
Fuente: elaboración propia

En la evaluación de 30 fincas en los municipios de Herveo y Casabianca, se identificaron los horizontes del suelo de la siguiente manera: el horizonte A es el más común en ambas localidades, mientras que en Casabianca predominan los horizontes O y B. Esto proporciona una visión general de la distribución de los horizontes del suelo en cada municipio. Además, considerando que las capas del perfil del suelo son O, A, B y C, solo en una finca se evidenció una alteración en su disposición.

Con respecto al color se reconocieron algunos que son representativos como el Horizonte O negro, Horizonte A marrón oscuro, Horizonte B un color marrón rojizo, Horizonte C gris.

Pendiente

Figura 13. Porcentaje de pendiente

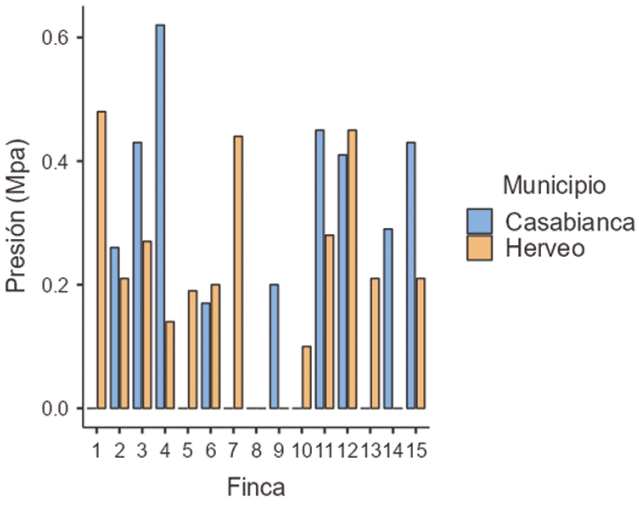


Fuente: elaboración propia

Se observa una mayor inclinación en los terrenos del municipio de Herveo, debido a que la mayoría de las fincas tienen una pendiente fuerte; de igual manera, en Casabianca se evidencian algunas fincas con pendientes fuertes y una proporción significativa de fincas con pendientes moderadas y otras con distintas características. Estas evaluaciones nos permiten comprender cómo se distribuyen las fincas según la pendiente y de esta manera tener un mayor control con respecto a posibles problemas de erosión y deslizamientos en la zona.

Compactación del suelo

Figura 14. Compactación del suelo



Fuente: elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos, podemos observar en los dos municipios valores de presión de penetración mayores e inferiores a 0.5 MPa, lo cual nos indica que los terrenos de las fincas seleccionadas aleatoriamente pueden presentan suelos compactados, con una mayor resistencia y a su vez suelos menos compactados pero con una menor resistencia; por consiguiente, esta información permite saber la calidad del suelo, para planificar y realizar las distintas gestiones agrícolas en dichos municipios.

Análisis de suelos

Las medidas descriptivas expuestas son para las variables de acuerdo con los resultados de análisis de suelo, en donde se ha permitido conocer cada uno y de esta manera comparar estos con cada municipio (CA) y (HE) (Anexo 1).

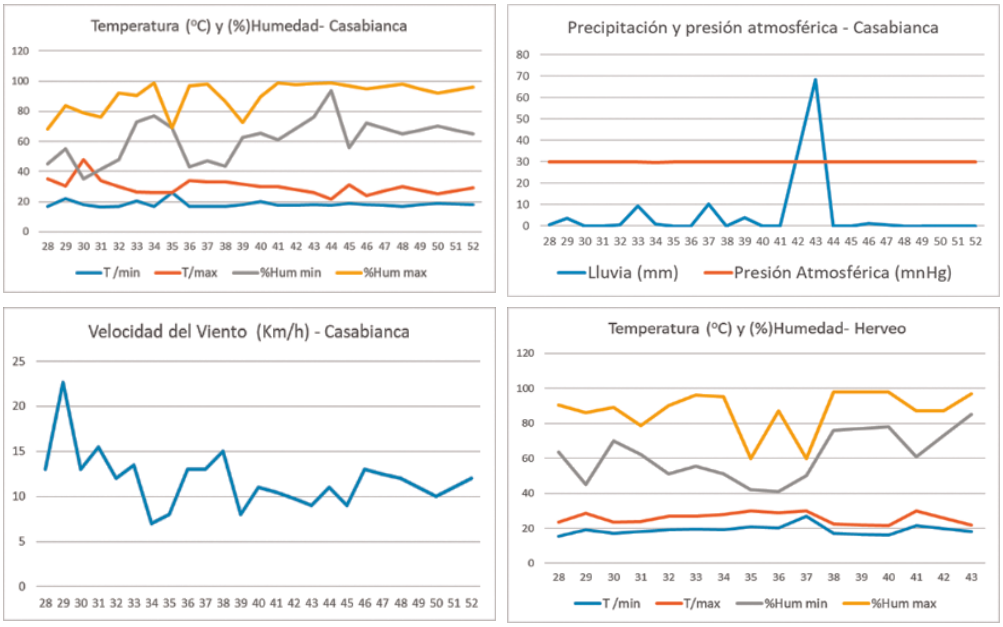
pH: de acuerdo con el análisis estadístico, podemos encontrar valores medios cercanos a 5.6 en ambos municipios, mostrando un rango ligeramente ácido.

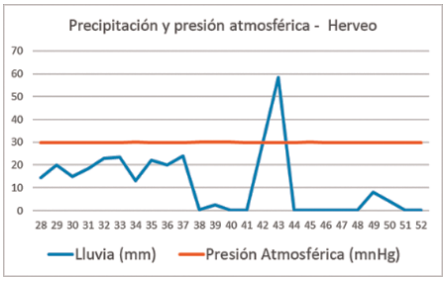
Relación de nutrientes: los resultados muestran las relaciones entre algunos elementos, como P/Zn, Fe/Zn y Ca/Mg, con variaciones mínimas entre ambos municipios. Esto sugiere una disponibilidad relativa de nutrientes en el suelo y sus interacciones.

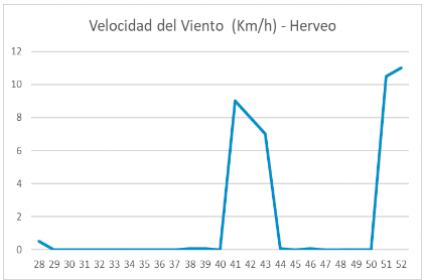
Análisis del clima

La instalación de estaciones meteorológicas permitió registrar los datos principales para evaluar las condiciones de las variables climáticas en ambos municipios durante el desarrollo del presente proyecto. Los resultados obtenidos muestran que la precipitación promedio anual en Casabianca es de 1500 mm, mientras que en Herveo alcanza los 1800 mm. Respecto a las temperaturas, Casabianca reportó una mínima de 15°C y una máxima de 23°C, mientras que en Herveo se registró una mínima de 14°C y una máxima de 22°C.

Figura 15. Comportamiento información recolectada por las estaciones en los municipios Casabianca y Herveo.







Fuente: elaboración propia

Al comparar estos resultados con el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres de Herveo, CORTOLIMA (2021), se observa que las veredas donde se encuentran ubicadas las estaciones meteorológicas se clasifican como provincia climática frío húmedo, caracterizada por alturas entre 2700 y 3000 msnm, precipitaciones anuales de 1800 a 2700 mm y temperaturas entre 12°C y 18°C.

En Casabianca se detectó una disminución en las precipitaciones en comparación con los valores registrados en el plan municipal. En cambio, los datos de Herveo se encuentran dentro de los rangos establecidos. Para ambos municipios, las temperaturas mínimas y máximas muestran variaciones, lo que refleja los efectos del cambio climático y las posibles consecuencias para las prácticas agrícolas.

Análisis de resultados de la determinación de ruido

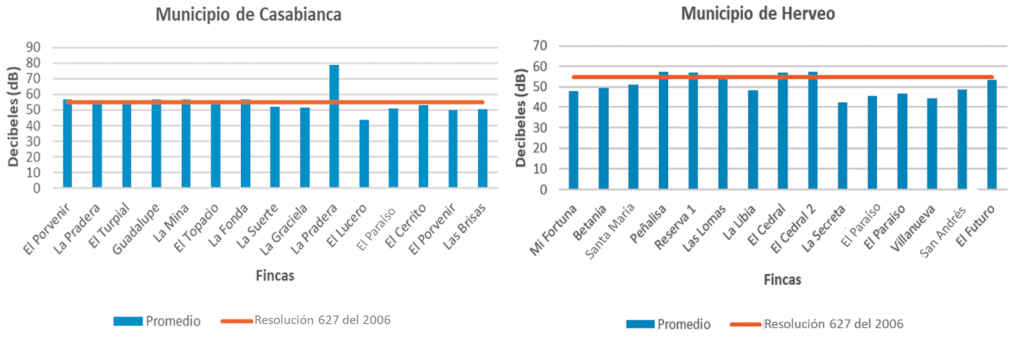
Con la finalidad de poder determinar las mediciones de ruido se utilizó un sonómetro Sound level data logger, referencias EC61672 – 1 Class2, donde se realizaron un total de 30 mediciones de ruido, correspondiente a los 15 predios por municipio.

Después de analizar todos los puntos y fincas de Casabianca y Herveo, se determinó que, para el municipio de Casabianca, el promedio de ruido fue de 54,24 dB, cumpliendo con los parámetros permisibles establecidos en la Resolución 627 de 2006, sector D: zona suburbana o rural de tranquilidad y ruido moderado. Cabe resaltar que la finca La Pradera, ubicada en la vereda Llanadas, presentó un valor superior debido a que, durante la medición, se registró una fuerte lluvia. No obstante, el promedio general para el municipio de Casabianca se mantiene dentro de los límites favorables establecidos por la normatividad sobre ruido.

Figura 16. Medición de ruido con el sonómetro en campo

Fuente: elaboración propia

Figura 17. Comportamiento de los decibeles registrados por cada finca de los municipios de Casabianca y Herveo



Fuente: elaboración propia

En el municipio de Herveo, el nivel promedio de ruido registrado fue de 50,83 dB, un valor que se encuentra dentro de los límites permisibles establecidos en la Resolución 627 de 2007. Según esta normativa, dicho nivel de ruido corresponde al sector D, clasificado como zona suburbana o rural de tranquilidad y ruido moderado. A continuación, se presenta una figura con los registros de los promedios de ruido para cada predio evaluado en Herveo.

En términos generales, ambos municipios presentan condiciones favorables respecto a las emisiones sonoras, sin evidenciar alteraciones significativas en la tranquilidad de sus habitantes ni impactos negativos sobre el entorno. De acuerdo con la normatividad

vigente, los niveles de ruido registrados no representan una problemática ambiental considerable. Sin embargo, con miras al futuro, es recomendable implementar estrategias y medidas que permitan mantener estos niveles óptimos, garantizando así la sostenibilidad acústica de la región.

Análisis de resultados componente agua

A continuación, se visualizan los resultados obtenidos de los parámetros analizados en el laboratorio de control calidad laboratorio AMBILAB.

Los resultados del análisis de las muestras de agua evidencian que los niveles de pH y conductividad del agua estaban dentro de los límites aceptables, lo que indica que las fuentes hídricas de Casabianca y Herveo son adecuadas para riego y consumo humano. Sin embargo, hubo variaciones en los niveles de nitratos y fosfatos, debido al uso de fertilizantes en las áreas agrícolas. Estas variaciones sugieren la necesidad de seguir monitoreando y gestionando el uso de estos productos para evitar la contaminación del agua.

El análisis de las muestras de agua reveló la presencia de coliformes totales y fecales, incluyendo *Escherichia coli*, lo que evidencia la necesidad de mejorar las prácticas de higiene y saneamiento en la región. La implementación de sistemas de tratamiento de agua es fundamental para reducir el riesgo de enfermedades de origen hídrico y garantizar la salud de la comunidad.

Al comparar los resultados con los estándares de calidad del agua establecidos por la normativa colombiana, se verificó que la mayoría de los parámetros analizados se encuentran dentro de los límites permisibles. Esto indica que, en términos generales, las fuentes hídricas en Casabianca y Herveo cumplen con los requisitos de calidad del agua. No obstante, se recomienda la adopción de prácticas sostenibles, como la optimización de la fertilización y el adecuado tratamiento de aguas residuales, lo que contribuiría no solo a mejorar la calidad del agua, sino también a preservar la salud del suelo y de la comunidad.

Adicionalmente, resulta esencial establecer un programa de monitoreo permanente que permita la detección temprana de posibles contaminantes y la implementación de medidas correctivas oportunas. Esto garantizaría la sostenibilidad a largo plazo del recurso hídrico y su disponibilidad para las generaciones futuras.

...La caracterización biológica vegetal no solo destaca la diversidad de cultivos presentes, sino que también revela su importancia en el paisaje agrícola...

Tabla 2. Análisis fisicoquímicos 15 puntos de muestreo municipio Casabianca y Herveo

	Proyecto generación de valor agregado y adopción tecnológica para la transformación de los residuos del cultivo de plátano (*Musa paradisiaca*) en municipios del departamento del Tolima Parámetros de calidad del agua en muestras tomadas en 7 puntos de muestreo municipio de Casabianca Tolima								
Parámetros	**Analisis fisicoquimicos de los puntos del Municipio de Casabianca**							**Norma (Resolución 2115/2007) Resolucion 631 de 2015 Decreto 1076 de 2015**	
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**Límite**	**Norma**
Carbonatos mg/L CaCO3	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	300 mg/L	*Resolucion 2115 de 2007 Art 7.*
Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO5)mg/L	<2	<2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	50 mg/LO_2	*Resolucion 631 de 2015*
Demanda Química de Oxigeno (DQO) mg/L	14	<2	14	13	39	7	< 2	200 mg/L O_2	
Detergentes - Tensoactivos (SAAM) mg/L SAAM	<0,10	0.26	<0,10	0.13	0.4	0.13	0.48	0,5 mg/L	*Decreto 1076 de 2015*
Mercurio Total mg/L Hg	<0,001	< 0,001	<0,001	< 0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,002 mg Hg/L	
Nitratos mg/L N-NO3	1.6	1.4	1.5	1.2	1.2	1.4	1.2	10,0 mg $N\text{-}NO_3\text{-}/L$	
Nitritos mg/L N-NO2	<0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	1,0 mg $N\text{-}NO_2/L$	
Ortofosfatos mg/L P-PO4	<1,0	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	0,5 mg/L	*Resolucion 2115 del 2007 Art 7.*

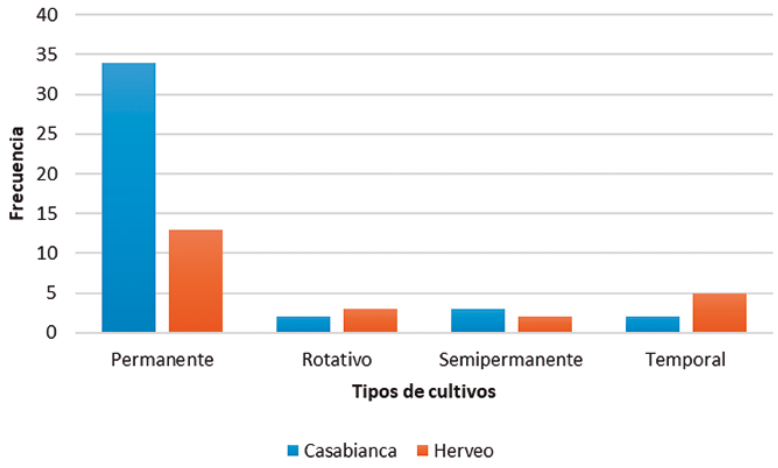
Fuente: Ambilab SAS (2023)

Medio biótico

Basados en la información recolectada durante el proceso de caracterización vegetal y animal, se consolidó lo siguiente: la caracterización biológica vegetal no solo destaca la diversidad de cultivos presentes, sino que también revela su importancia en el paisaje agrícola y el componente biótico de la zona. El municipio de Casabianca muestra una diversidad significativa de cultivos, incluyendo permanentes, rotativos, semipermanentes y temporales, según el análisis de los datos recolectados en las fincas. Esta diversidad es beneficiosa para la seguridad alimentaria y la economía local, ya que reduce la dependencia de un solo tipo de cultivo.En cuanto al municipio de Herveo, también se observa una diversidad significativa de cultivos, que abarca permanentes, semipermanentes y temporales, generando ingresos sostenibles y contribuyendo a la conservación del suelo. Cabe resaltar que Casabianca presenta la mayor cantidad de especies correspondientes a cultivos permanentes.

Complementando la información mencionada, se observaron los mosaicos del cultivo, muy característicos de estas regiones del departamento ya que por las condiciones climáticas favorece el crecimiento de diferentes cultivos como café, plátano, aguacate, entre otros.

Figura 18. Tipos de cultivo por zona de muestreo



Fuente: elaboración propia

Figura 19. Mosaicos de cultivo de café y aguacate en los municipios de Herveo y Casabianca, Tolima.

Fuente: elaboración propia

En la caracterización de la fauna, se analizó la siguiente información: en ambos municipios se caracteriza por la presencia de diversas especies, tanto domésticas como silvestres. En cuanto a las especies domésticas, se han observado perros, gatos, gallinas y gallos, los cuales están estrechamente relacionados con las actividades agrícolas y la vida rural de la zona (Salazar, M., 2023). Además de las especies domésticas, también se han registrado algunas especies silvestres en la región. Entre ellas, se ha observado la presencia de serpientes como *Oxybelis fulgidus* reconocida como Bejuquilla, serpiente platanera, serpiente verde, las cuales desempeñan un papel ecológico importante en el control de poblaciones de roedores y otros pequeños vertebrados (Salazar, M., 2023). A continuación, se muestran algunas especies de animales domésticas encontradas en las fincas.

En la caracterización de la fauna, se analizó la siguiente información: en ambos municipios se caracteriza por la presencia de diversas especies, tanto domésticas como silvestres.

Figura 20. Especies de animales encontradas en las diferentes fincas

Fuente: elaboración propia

Conclusiones

El estudio permitió caracterizar las condiciones edafoclimáticas de los municipios de Casabianca y Herveo, evidenciando variaciones significativas en la pendiente, la fertilidad del suelo y las condiciones climáticas. Se resalta la importancia de implementar estrategias de manejo sostenible, como fertilización controlada, conservación del suelo y monitoreo continuo del recurso hídrico, para garantizar la productividad del cultivo de plátano y minimizar riesgos asociados a la erosión y contaminación.

A partir de los valores obtenidos en la determinación del ruido, el promedio para el municipio de Casabianca fue de 54,24 dB, mientras que en Herveo fue de 50,83 dB. Estos valores se compararon con los límites permisibles establecidos por la Resolución 627 de 2007, encontrando cumplimiento con la clasificación para el sector D (zona suburbana o rural de tranquilidad y ruido moderado), lo que favorece la calidad de vida y la salud de los habitantes, sin perturbaciones significativas.

Las condiciones climáticas varían considerablemente entre los municipios de Casabianca y Herveo, lo que afecta directamente la agricultura local. En Herveo, es esencial aplicar estrategias de adaptación para enfrentar las bajas temperaturas y las fuertes precipitaciones, lo cual implica un manejo eficiente del agua y protección de los cultivos. Por su parte, en Casabianca se debe prestar especial atención a la gestión del agua y al cuidado de los cultivos debido a la elevada velocidad del viento.

Al comparar estos datos con los históricos del IDEAM, se obtiene una comprensión más profunda de las variaciones climáticas y su impacto en la región. Es crucial desarrollar estrategias agrícolas sostenibles que no solo incrementen la productividad, sino que también empoderen a las comunidades rurales para enfrentar los desafíos climáticos.

Las fuentes hídricas seleccionadas en las zonas veredales de ambos municipios no presentan alteraciones significativas en su calidad ni valores críticos de contaminación. A pesar de las prácticas agrícolas en el manejo del cultivo de plátano y otras actividades antrópicas, los valores se mantienen dentro de los límites permisibles establecidos por la normativa vigente, lo que sugiere la necesidad de continuar con el monitoreo de la calidad del agua para tomar medidas correctivas si fuera necesario.

El análisis de las pendientes en ambos municipios muestra que Herveo presenta pendientes pronunciadas (según la escala del IGAC: muy inclinadas - D, y ligeramente escarpadas - E), mientras que algunas fincas de Casabianca también presentan pendientes de este tipo. Esto aumenta el riesgo de erosión hídrica y degradación del suelo.

En cuanto a la estructura del suelo, en Casabianca predominan los horizontes O y B, lo cual indica un buen contenido de materia orgánica en el horizonte O, mientras que el horizonte B, a pesar de carecer de humus, refleja la continua práctica agrícola. Se recomienda incorporar materia orgánica al manejo del suelo para mejorar su fertilidad y minimizar las posibles afectaciones al cultivo de plátano. En ambos municipios, el horizonte A presenta una mayor riqueza en materia en descomposición y humus, lo que representa una ventaja para la calidad del suelo.

La caracterización vegetal y animal del componente biótico revela que ambos municipios cuentan con cultivos permanentes, rotativos, semipermanentes y temporales, lo que subraya la importancia de estos recursos para las comunidades. Es esencial implementar prácticas agrícolas sostenibles para garantizar su preservación y contribuir al bienestar económico de la región.

Referencias

Araujo, E., Ramon, F., y Miras, J. (2023). *Manual de campo.* https://citarea.cita-aragon.es/bitstream/10532/6721/3/Manual-de-Campo-SOS-SUELO-Proyecto-Demo-CITA-2023-v01%20%281%29.pdf

Camelo, M. D. F. (2021). *En el visor geográfico puedes conocer los niveles de ruido ambiental en Bogotá.* Observatorio Ambiental de Bogotá. https://oab.ambientebogota.gov.co/en-el-visor-geografico-puedes-conocer-los-niveles-de-ruidoambiental-en-bogota/

Corporación Autonomía Regional del Tolima - CORTOLIMA (2015). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca (POMCA) del Río Gualí*. Corporación Autónoma Regional de Tolima.

Duarte, P., y Montaño, C. (2020). *Manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad espacial de suelos y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras*. https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/02595413-e862-4a55-bee6-4d305de89a6b/content

Echeverria, E., Castañeda, E., Robles, C., Gallego, V., Martínez, G., y Ortiz, G. (2023). Indiciadores de calidad como herramientas útiles para evaluar el estado de la fertilidad del suelo. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* (10) 49-67. https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/article/view/376/340

FAO. (2011). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW) – Managing Systems at Risk*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO (2012). *Evaluación del impacto ambiental. Directrices para los proyectos de campo de la FAO*. http://www.fao.org/3/a-i2802s.pdf

Farr, T. G., et al., (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. Reviews of Geophysics, 45(2).

IDEAM. (2020). *Informe de variables climáticas: Análisis comparativo y de largo plazo.* Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/new_modelo/CPT/informe/Informe.pdf

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). (2021). *Clasificación de las tierras por su capacidad de uso*. https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/in-gag-pc05-02_clasificacion_de_las_tierras_por_su_capacidad_de_uso.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). *Climas de Colombia 2023* https://www.ideam.gov.co/

Nolan, B. T., Ruddy, B. C., Hitt, K. J., y Helsel, D. R. (2002). A National Look at Nitrate Contamination of Ground Water. *Water Conditioning and Purification, 44*(6), 76-79. https://water.usgs.gov/nawqa/nutrients/pubs/wcp_v39_no12/

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2006). Resolución 0627 de 2006 por medio de la cual se establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental. Bogotá D.C. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-0627-de-2006.pdf

Molden, D. (Ed.). (2007). Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. Earthscan, and International Water Management Institute. https://archive.iwmi.org/assessment/files_new/synthesis/Summary_SynthesisBook.pdf

Monserrate, L., y Vera, M. (2023). *Características del suelo con aptitud forestal en el Recinto Santa Rosa del Cantón Jipijapa.* [Tesis Universidad Estatal del Sur de Manabí]. https://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/853/browse?type=title&sort_by=1&order=ASC&rpp=15&etal=10&null=&offset=48

Pahaut, B., Brizuela Barros, C., Videla, F., Cuitiño, G., Bellmann, L., Peisino, L., Canavesi, L., Matar Arturo, M., Dolores Arambu, M., Castaño Llugard, N., Costamagna, P., y Cabrera, S. (2020). *Protocolos de ensayos de campo para la identificación de suelos* (7) 1-33). https://redprotierra.com.ar/wp-content/uploads/2020/11/Protocolo-de-ensayos-de-campo-para-la-identificaci%C3%B3n-de-suelos.pdf

Raju, C., Pazhanivelan, S., Perianadar, I. V., Kaliaperumal, R., Sathyamoorthy, N. K., y Sendhilvel, V. (2024). Climate Change as an Existential Threat to Tropical Fruit Crop Production—A Review. *Agriculture; Basel*, *14*(11). https://www.mdpi.com/2077-0472/14/11/2018#

Sayre, R., Roca, E., Sedaghatkish, G., Young, B., Keel, S., Roca, R., y Sheppard, S. (2002). *Un Enfoque en la Naturaleza: Evaluaciones ecológicas rápidas*. Virginia: The Nature Conservancy.

Vargas, D., Cerón, A., Olivares, L., y Bobadilla, M. (2020). *Manual de Evaluación de Suelos*. *Énfasis en memoria edáfica, materia orgánica e hidroedafología* https://www.smcsmx.org/files/concurso/2020/Manual3CMES2020.pdf

WHO. (2017). Guidelines for Drinking-Water Quality (4th ed.). Geneva: World Health Organization. https://biblioteca.imarpe.gob.pe/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=15808

Anexos

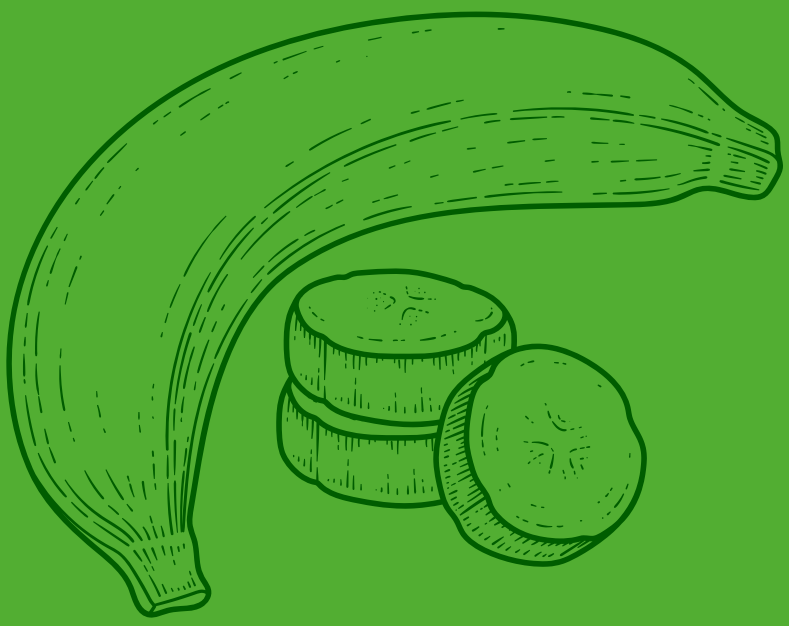
Tabla 1. Análisis estadístico-resultados muestras de suelos

Descriptiva	MCPIO	N	Media	IC Inferior	IC Superior	Mediana	DE	Varianza	Mínimo	Máximo	25th	50th	75th
Mg	CA	15	13.058	11.263	14.853	12.45	3.241	10.501	9.52	20.63	10.43	12.45	14.85
Mg	HE	15	13.414	11.582	15.246	13.38	3.080	10.944	8.56	20.83	10.755	13.38	15.09
Na	CA	15	1.973	0.601	3.345	1.33	2.478	6.140	0.78	11.3	1.18	1.33	1.46
Na	HE	15	1.163	1.020	1.307	1.16	0.260	0.067	0.75	1.62	1.005	1.16	1.315
Ca/Mg	CA	15	6.067	5.213	6.840	6.2	1.669	2.786	2.6	12.6	5.35	6.2	6.75
Ca/Mg	HE	15	5.773	4.981	6.565	5.6	2.005	4.050	3.5	8.5	4.85	5.6	7
Mg/K	CA	15	2.767	2.069	3.471	2.6	1.273	1.620	1.1	3.8	1.8	2.6	3.75
Mg/K	HE	15	2.58	1.944	3.217	2.8	1.148	1.317	1.1	4.9	1.6	2.8	3.05
Ca/K	CA	15	16.24	11.732	20.749	13	8.141	66.281	7.6	31.2	9.3	13	21.65
Ca/K	HE	15	14.707	10.280	19.131	11.2	7.993	63.891	6.7	34.2	9.25	11.2	16.85
Ca+Mg/K	CA	15	19.013	13.906	24.121	15.1	9.223	85.058	8.9	35.9	11.65	15.1	25.05
Ca+Mg/K	HE	15	17.28	13.324	22.226	14	9.311	79.765	8.3	38.5	10.8	14	20.85
Ca/B	CA	15	2425.873	1875.897	2975.850	18570	993.129	986305.098	1305	4016.7	1594.15	18570	3356.7

Descriptiva	MCPIO	N	Media	IC Inferior	IC Superior	Mediana	DE	Varianza	Mínimo	Máximo	25th	50th	75th
Ca/B	HE	15	2046.68	1663.724	2429.636	21242	691.529	478212.587	1063.7	3671.8	1464.6	21242	2276.6
P/Zn	CA	15	20.333	8.265	32.401	13.2	21.792	474.882	3.6	88.9	7.55	13.2	24.3
P/Zn	HE	15	19.333	10.923	27.744	15.4	15.187	230.640	4.6	51.2	6.05	15.4	24.7
Fe/Zn	CA	15	35.213	16.146	54.281	23.4	34.432	1185.563	13.8	143.1	17.75	23.4	26.55
Fe/Zn	HE	15	37.853	20.853	54.854	37.1	30.698	942.394	11.1	127.4	15.55	37.1	49.3
Fe/Mn	CA	15	2.447	2.190	2.704	2.6	0.464	0.216	1.8	3.2	2	2.6	2.85
Fe/Mn	HE	15	2.94	2.272	3.608	2.7	1.206	1.455	1.5	5.9	2	2.7	3.45

Nota. El CI de la media supone que las medias muestrales siguen una distribucióNn t con N - 1 grados de libertad

Fuente: elaboración propia



CAPÍTULO 2

GESTIÓN PSICOSOCIAL EN LA GENERACIÓN DE VALOR AGREGADO EN EL CULTIVO DE PLÁTANO: ABORDAJE DESDE LA EXPERIENCIA COMUNITARIA

Resumen

La revisión psicosocial realizada en el contexto de los platanicultores del departamento del Tolima se fundamentó en una metodología exhaustiva que combinó la recolección y el análisis de datos tanto cualitativos como cuantitativos. La población objetivo estuvo constituida por agricultores dedicados al cultivo de plátano en los municipios de Herveo y Casabianca, con un enfoque específico en aquellos que experimentaban factores de riesgo psicosocial derivados de fenómenos sociales que afectan a la región, tales como la inestabilidad económica y la falta de apoyo estatal. Los resultados obtenidos revelaron una serie de desafíos psicosociales significativos entre los platanicultores, incluyendo altos niveles de estrés, ansiedad y falta de recursos para hacer frente a las presiones laborales y ambientales. Además, se identificó una necesidad urgente de intervenciones psicosociales que aborden estos problemas de manera integral, proporcionando apoyo emocional, capacitación en habilidades de afrontamiento y fomentando la cohesión comunitaria. Las conclusiones destacaron la importancia crítica de abordar no solo los aspectos técnicos y económicos de la agricultura, sino también los factores psicológicos y sociales que afectan la salud y el bienestar de los agricultores. Se subrayó la necesidad de políticas y programas gubernamentales que promuevan una gestión psicosocial efectiva en el sector agrícola, con el fin de garantizar la sostenibilidad y el desarrollo integral de las comunidades rurales en el Tolima.

Palabras clave: bienestar social, economía local, resiliencia comunitaria, transformación productiva, sostenibilidad agrícola

Abstract

The psychosocial review conducted within the context of plantain farmers in the department of Tolima was based on a comprehensive methodology that combined the collection and analysis of qualitative and quantitative data. The selected population consisted of farmers dedicated to platain cultivation in the municipalities of Herveo and Casabianca, with a focus on those facing psychosocial risk factors due to social phenomena affecting the area, such as economic instability and lack of state support. The results revealed a series of significant psychosocial challenges among banana farmers, including high levels of stress, anxiety, and a lack of resources to cope with labor and environmental pressures. Additionally, an urgent need for psychosocial interventions addressing these issues comprehensively was identified, providing emotional support, coping skills training, and fostering community cohesion. The conclusions highlighted the critical importance of addressing not only the technical and economic aspects of agriculture but also the psychological and social factors affecting the health and well-being of farmers. The need for government policies and programs promoting effective psychosocial management in the agricultural sector was emphasized to ensure the sustainability and integral development of rural communities in Tolima.

Keywords: Social wellbeing, Local economy, Community resilience, Productive transformation, Agricultural sustainability

Introducción

La adopción de un enfoque holístico y psicosocial en la implementación de proyectos para la transformación de residuos del cultivo de plátano en los municipios de Herveo y Casabianca, departamento del Tolima, emerge como una necesidad imperativa en el contexto de desarrollo sostenible. Al integrar consideraciones técnicas, económicas y sociales, se amplía la comprensión de los desafíos y oportunidades asociados con la generación de valor agregado y la adopción tecnológica en estas comunidades (Roa y Alarcón, 2022). Desde una perspectiva científica, este enfoque reconoce la interacción compleja entre factores como la percepción comunitaria, las dinámicas de género, la infraestructura social y las actitudes hacia la innovación tecnológica. A través de un análisis riguroso de estos elementos, se puede diseñar e implementar intervenciones más efectivas, que no solo maximicen la eficiencia y la rentabilidad de las operaciones, sino que también promuevan la equidad, la participación y el bienestar general de la población local (Carazo y Valverde, 2012). Adoptar un enfoque científico y holístico en la planificación y ejecución de proyectos de este tipo no solo garantiza la viabilidad técnica

y económica, sino que también fortalece la cohesión social, la resiliencia comunitaria y la sostenibilidad a largo plazo.

Para implementar un enfoque psicosocial efectivo con las comunidades de agricultores en el Tolima, que se enfrentan a distintos fenómenos sociales que los colocan en situaciones de riesgo de vulnerabilidad, es fundamental seguir un proceso estructurado y participativo. En primer lugar, se debe realizar un análisis exhaustivo de las necesidades y recursos de la comunidad, mediante la gestión participativa de los agricultores en la identificación de los desafíos que enfrentan y las fortalezas que poseen (Giaccio et al., 2020). Posteriormente, es crucial establecer espacios de diálogo y colaboración entre los diversos actores locales, incluyendo autoridades gubernamentales, organizaciones no gubernamentales y líderes comunitarios, con el fin de co-crear soluciones adaptadas a las realidades específicas de cada comunidad (Posada y Parra, 2020).

Durante este proceso, es esencial incorporar metodologías participativas que fomenten la expresión de las necesidades emocionales y sociales de los agricultores, así como el fortalecimiento de sus habilidades de afrontamiento y resiliencia (Berry et al., 2022). Además, se deben diseñar e implementar programas de capacitación y apoyo psicosocial, que aborden temas como el manejo del estrés, la comunicación efectiva y la toma de decisiones en situaciones de incertidumbre. Por esto es fundamental evaluar de manera continua el impacto de las intervenciones psicosociales, mediante la recopilación de datos cualitativos y cuantitativos, con el fin de ajustar y mejorar continuamente las estrategias de apoyo a las comunidades agrícolas vulnerables en el Tolima.

La necesidad de llevar a cabo una revisión desde la perspectiva de la Gestión Psicosocial en la comunidad de agricultores de plátano surge como una respuesta crucial a los desafíos multidimensionales que enfrentan estas comunidades en el Tolima (Gutiérrez et al., 2023). Dado que estos agricultores se encuentran en situaciones de vulnerabilidad debido a una variedad de factores sociales, económicos y ambientales, es fundamental adoptar un enfoque integral que aborde tanto las necesidades materiales como las emocionales y sociales.

La gestión psicosocial, acorde con distintos autores (Sánchez y Jiménez, 2023; Brigance et al., 2018; Moya et al., 2020; Malanski et al., 2019) ofrece una estructura teórica y metodológica para comprender y abordar los impactos psicosociales de eventos traumáticos, cambios socioeconómicos y otros fenómenos que afectan la vida cotidiana de los agricultores (Appiah, 2020). Al revisar la gestión psicosocial en esta comunidad, se puede identificar de manera más precisa las áreas de intervención necesarias, fortaleciendo así la resiliencia, el bienestar emocional y la capacidad de adaptación de los agricultores ante los desafíos presentes y futuros.

Riesgos psicosociales de la agricultura en torno al cultivo de plátano

La exploración de la literatura académica en el ámbito psicosocial extralaboral revela una creciente atención e importancia hacia este tema en las organizaciones contemporáneas, caracterizándose por un incremento en la conciencia normativa y metodológica en relación con la prevención de riesgos ocupacionales (Calle Díaz, 2019). Se enfoca específicamente en abordar tanto las manifestaciones físicas como psicológicas del estrés laboral, las cuales pueden tener consecuencias adversas para la salud y el bienestar de los trabajadores rurales. En este contexto, el Ministerio de Protección Social de Colombia, en 2008, estableció disposiciones y responsabilidades para identificar, evaluar, prevenir e intervenir en la exposición a factores de riesgo psicosocial en el entorno laboral.

Estas iniciativas nacionales están alineadas con los resultados de investigaciones realizadas en diversos países, es importante destacar que los riesgos psicosociales en el trabajo están vinculados a aspectos organizacionales, ambientales y personales relacionados con la actividad laboral (de los Santos y Cárdenas, 2022; Galvis et al., 2020). Los esfuerzos de profesionales e investigadores se centran en desvelar los elementos subyacentes en la relación de las personas con el trabajo y en cómo el mercado laboral actual genera determinadas demandas laborales.

La identificación y evaluación de estos factores psicosociales, requiere de cuestionarios diseñados para capturar la percepción de los trabajadores sobre las condiciones laborales y su experiencia en el ámbito psicosocial. La aplicación de herramientas de investigación es esencial para comprender los riesgos psicosociales a los que están expuestos los trabajadores, lo que permite reconocer su impacto en la vida laboral, social y familiar de los individuos, afectando directamente su salud mental.

Ruiz (2019) plantea que la implementación de una gestión psicosocial efectiva puede ofrecer una serie de beneficios significativos para los platanicultores. En primer lugar, un enfoque psicosocial bien estructurado puede ayudar a mejorar el bienestar emocional y mental de los agricultores, proporcionando herramientas y recursos para hacer frente al estrés y la presión asociados con la actividad agrícola (Cruz et al., 2021). Esto contribuye a reducir los niveles de ansiedad y depresión, promoviendo así una mejor calidad de vida. Además, al fomentar un ambiente de trabajo más saludable y positivo, la gestión psicosocial puede fortalecer la cohesión y el sentido de comunidad entre los agricultores, facilitando la colaboración y el apoyo mutuo. Asimismo, al abordar los aspectos psicológicos y sociales del trabajo agrícola, se pueden mejorar la productividad y la eficiencia, ya que los agricultores se sentirán más motivados, comprometidos y capacitados para enfrentar los desafíos cotidianos (Ocampo, 2019).

La gestión psicosocial emerge como un componente fundamental para mejorar la calidad de vida y el bienestar de los platanicultores en el departamento del Tolima al implementar estrategias psicosociales efectivas, se pueden obtener una serie de beneficios significativos (Contreras Valencia, 2019), que van desde la reducción del estrés y la ansiedad hasta el fortalecimiento de la cohesión comunitaria y la mejora de la productividad agrícola.

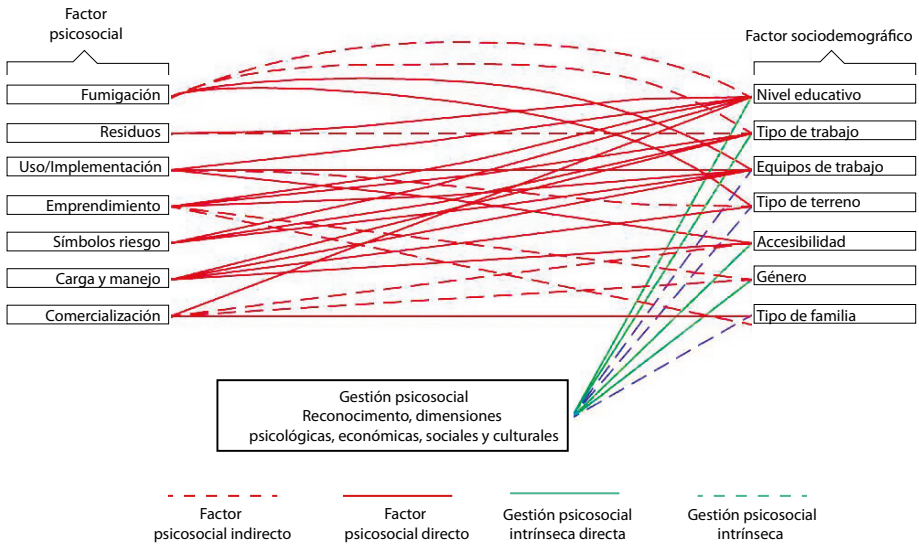
Es crucial reconocer la importancia de abordar no solo los aspectos técnicos y económicos de la agricultura, sino también los factores psicológicos y sociales que influyen en la vida de los agricultores. Además, se destaca la necesidad de una mayor atención por parte de las autoridades gubernamentales y las organizaciones pertinentes en la implementación de programas y políticas que promuevan una gestión psicosocial integral y efectiva en el sector agrícola. En última instancia, al priorizar el bienestar emocional y mental de los platanicultores, se puede contribuir significativamente a la sostenibilidad y el desarrollo sostenible de las comunidades rurales en el Tolima (Pulido y Beltrán, 2022).

Gestión psicosocial

El análisis de los factores psicosociales en los cultivadores de plátano de los municipios de Herveo y Casabianca en el departamento del Tolima revela una compleja interacción entre las dimensiones psicológicas, económicas, sociales y culturales (Londoño, 2016). La figura 1 proporciona un esquema detallado de estas interacciones, destacando la importancia de abordar los factores psicosociales desde una perspectiva integral que incluya tanto las características sociodemográficas como los aspectos operativos del cultivo, los factores sociodemográficos, tales como el nivel educativo, el tipo de trabajo, los equipos de trabajo, el tipo de terreno, la accesibilidad, el género y el tipo de familia, influyen directamente en la gestión psicosocial de los cultivadores de plátano (Dearmas, 2012). El nivel educativo puede determinar la capacidad de los agricultores para implementar prácticas seguras y eficientes en la fumigación y manejo de residuos, lo que a su vez impacta su bienestar psicológico y social (Reyes, 2020). Un mayor nivel educativo facilita la adopción de tecnologías y prácticas agrícolas avanzadas, mejorando la productividad y reduciendo los riesgos asociados a la exposición a químicos y otras prácticas peligrosas.

El tipo de trabajo y los equipos utilizados también tienen una influencia significativa. Los trabajos que requieren mayor esfuerzo físico o que implican riesgos elevados pueden afectar negativamente la salud mental de los trabajadores, mientras que el uso de equipos adecuados puede mitigar estos efectos (García y Bravo, 2022). La accesibilidad al terreno, determinada por factores como la geografía y la infraestructura, puede limitar o facilitar el acceso a recursos esenciales, afectando tanto la eficiencia del trabajo como el bienestar general de los agricultores.

Figura 1. Relación gestión factores psicosociales con factores sociodemográficos



Fuente: elaboración propia

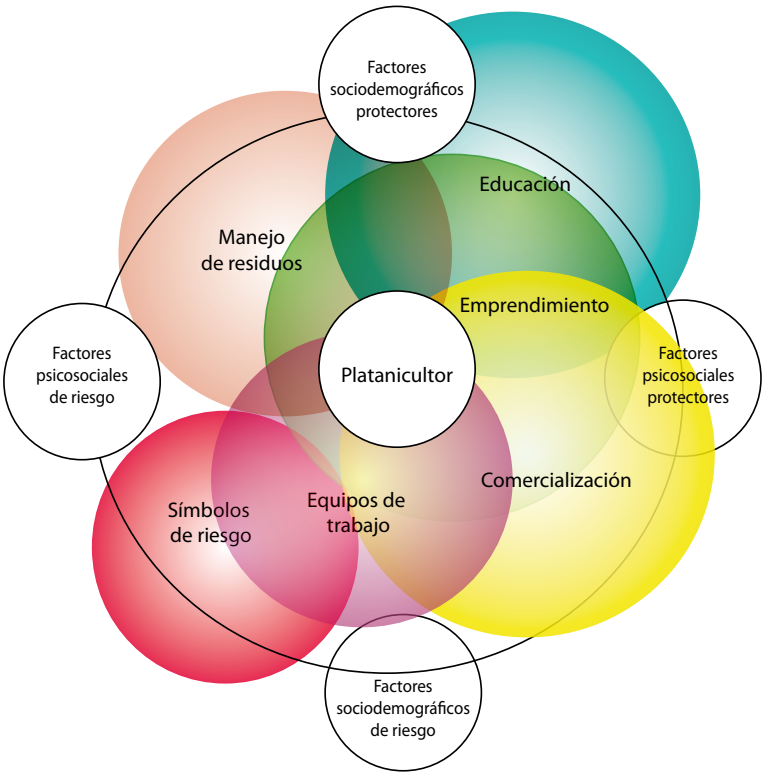
El género y el tipo de familia son factores que también deben ser considerados en la gestión psicosocial. Las mujeres y los hombres pueden enfrentar diferentes desafíos y riesgos en el trabajo agrícola, y las responsabilidades familiares pueden influir en la disponibilidad de tiempo y energía para dedicarse a las actividades agrícolas (Sarrin, 2023). Un enfoque que considere estas diferencias es crucial para desarrollar estrategias de apoyo psicosocial efectivas.

La gestión psicosocial en este contexto debe reconocer y abordar estas dimensiones interrelacionadas. La fumigación, los residuos, el uso e implementación de nuevas tecnologías, el emprendimiento, la identificación y manejo de símbolos de riesgo, la carga y manejo de productos y la comercialización son factores psicosociales que interactúan con los factores sociodemográficos. Por ejemplo, la capacidad de los agricultores para emprender nuevas iniciativas o comercializar sus productos de manera efectiva está influenciada por su nivel educativo, el tipo de terreno y la accesibilidad a mercados.

Un enfoque integral en la gestión psicosocial que incorpore estos factores puede mejorar significativamente el bienestar de los cultivadores de plátano. Es esencial implementar programas de formación y apoyo que consideren las características sociodemográficas y los desafíos específicos del cultivo de plátano en esta región. Estos programas deben fomentar la adopción de prácticas seguras y eficientes, proporcionar acceso a recursos y tecnologías adecuadas, y ofrecer apoyo psicológico y social para manejar el estrés y los desafíos asociados al trabajo agrícola. La caracterización y compren-

sión de los factores sociodemográficos y su interacción con los factores psicosociales (Figura 2) es crucial para desarrollar estrategias efectivas de gestión psicosocial en los municipios de Herveo y Casabianca. Este enfoque no solo mejora la calidad de vida de los agricultores, sino que también optimiza la productividad y sostenibilidad del cultivo de plátano en el departamento del Tolima.

Figura 2. Diagrama de Venn sobre la relación de factores sociodemográficos y psicosociales de riesgo y protectores en platanicultores



Fuente: elaboración propia

Los factores sociodemográficos de riesgo comprenden variables como la edad, el género, el nivel socioeconómico y las condiciones de vida, que pueden aumentar la vulnerabilidad de los platanicultores. Estos factores afectan negativamente la salud mental y física, disminuyendo la capacidad productiva y la calidad de vida de los agricultores. Por su parte, los factores psicosociales de riesgo abarcan elementos como el estrés laboral, la falta de apoyo social y las condiciones laborales precarias (Osorio, 2021). Estos factores pueden provocar problemas de salud mental, como ansiedad y depresión, afectando el bienestar general de los agricultores.

En el ámbito de los factores protectores, los factores sociodemográficos protectores incluyen variables que ofrecen ventajas o protección, tales como un buen nivel educativo, acceso a servicios de salud y una red de apoyo social. Estos factores son cruciales para mitigar los efectos negativos de los riesgos y mejorar la resiliencia y la calidad de vida de los agricultores (Trujillo y Orjuela, 2020). Asimismo, los factores psicosociales protectores abarcan elementos como el apoyo social, condiciones laborales favorables y programas de capacitación y formación, que contribuyen a reducir el estrés y mejorar el bienestar psicológico de los agricultores, promoviendo un entorno de trabajo más saludable.

En cuanto a las dimensiones específicas, el manejo de residuos aparece como un factor dual. Actúa como un factor psicosocial de riesgo si no se maneja adecuadamente, pero puede ser un factor sociodemográfico protector cuando se implementan buenas prácticas. La educación y el emprendimiento son destacados tanto en los factores psicosociales protectores como en los sociodemográficos protectores, ya que mejoran la capacidad de los agricultores para enfrentar desafíos, adoptar mejores prácticas agrícolas y diversificar sus fuentes de ingreso, mejorando así la estabilidad económica y reduciendo la dependencia de un solo ingreso (Armas y López, 2021).

La comercialización es identificada como un factor psicosocial protector debido a su capacidad para asegurar ingresos estables, pero también puede ser un factor sociodemográfico de riesgo en situaciones de inestabilidad comercial, lo que afecta la estabilidad económica y el bienestar de los agricultores. Los equipos de trabajo son fundamentales para la seguridad y eficiencia, y pueden ser tanto factores psicosociales de riesgo como sociodemográficos de riesgo si la disponibilidad y calidad del equipo no son adecuadas, incrementando así los riesgos y afectando negativamente a los trabajadores (Valencia, 2016). Los símbolos de riesgo se ubican tanto en los factores psicosociales de riesgo como en los sociodemográficos de riesgo, ya que la falta de estos símbolos puede aumentar los riesgos, mientras que su presencia adecuada puede proteger a los trabajadores.

Comprendiendo este contexto, se destaca la complejidad de las interacciones entre factores sociodemográficos y psicosociales en la vida de los platanicultores. Para mejorar su bienestar, es esencial abordar tanto los factores de riesgo como fortalecer los factores protectores mediante intervenciones integrales y políticas públicas adecuadas. Este enfoque permitirá una gestión psicosocial más efectiva, contribuyendo a la sostenibilidad y el bienestar general de los platanicultores.

Psicología ambiental en la gestión psicosocial de platanicultores del Tolima

La psicología ambiental, una disciplina en continuo desarrollo dentro de la psicología, es esencial para entender cómo las personas se comportan en función de su relación

con el entorno en el que se desenvuelven (Cambronero Rodríguez, 2016). Esta disciplina se basa en la percepción, categorización y clasificación de los entornos, los cuales influyen en las creencias, emociones y conductas de los individuos. En el contexto de los agricultores de plátano en Herveo y Casabianca, Tolima, las dinámicas psicosociales son fundamentales para comprender cómo estos trabajadores interactúan con su entorno. Cada experiencia con el ambiente puede desencadenar diferentes respuestas cognitivas y emocionales, dependiendo de las vivencias personales.

La habilidad para adaptarse al entorno es crucial para los cultivadores de plátano. La relación de los individuos con su medio ambiente y el uso de los recursos disponibles pueden influir significativamente en su bienestar y sentido de pertenencia. Esta interacción bidireccional entre el individuo y su entorno puede reflejar una adaptación exitosa, donde ambos se influyen mutuamente. La complejidad de esta interacción requiere fundamentos teóricos sólidos para entender las variables implicadas. La gestión psicosocial en los agricultores de plátano de Herveo y Casabianca en Tolima debe abordarse desde una perspectiva integral, considerando su relación con el entorno, sus experiencias y las dinámicas sociales y económicas que afectan su bienestar. La psicología ambiental ofrece un marco valioso para entender y mejorar estas interacciones, permitiendo a los agricultores adaptarse mejor a sus condiciones de vida y trabajo.

Para consolidar esta propuesta de gestión psicosocial en platanicultores, es crucial entender cómo los efectos cognitivos influyen en su bienestar y productividad. Los efectos cognitivos se refieren a cómo las experiencias y el conocimiento adquirido impactan la capacidad de los platanicultores para adaptarse y gestionar su entorno. La cognición permite a los agricultores ejecutar procesos de aprendizaje en su entorno, variando según los niveles de complejidad (Sari y Ceballos, 2022). Las capacidades mentales permiten interpretar realidades y comprender situaciones basadas en el conocimiento propio.

A través de la percepción, los platanicultores recolectan información sobre su entorno, ya sea mediante sonidos, imágenes, olores y otras experiencias sensoriales. Esta información se procesa y se retiene en la memoria, lo que facilita la resolución de problemas, un efecto cognitivo predominante en el comportamiento humano. Cuando se presenta una situación problemática, los agricultores utilizan su conocimiento y experiencia para resolverla, empleando procesos cognitivos y de pensamiento.

Estos procesos son fundamentales para los efectos posteriores, como recordar, aplicar, comprender, evaluar y crear. Estos componentes del diseño cognitivo permiten a los platanicultores enfrentar y adaptarse a las diversas situaciones y desafíos que se presentan en su entorno. La gestión psicosocial efectiva debe considerar estos aspectos cognitivos para mejorar su capacidad de adaptación, bienestar y productividad en el contexto de su trabajo agrícola.

Consideraciones finales

La gestión psicosocial en platanicultores es un aspecto crítico que influye directamente en el bienestar y la productividad de los agricultores. En los municipios de Herveo y Casabianca, la implementación de estrategias psicosociales se torna esencial debido a los múltiples desafíos que enfrentan estos agricultores, tales como la inestabilidad económica y la falta de apoyo estatal. Los resultados de estudios realizados en esta región revelan altos niveles de estrés y ansiedad entre los platanicultores, lo que subraya la necesidad urgente de intervenciones psicosociales integrales.

El análisis de los factores psicosociales y sociodemográficos muestra una compleja interacción entre dimensiones como la educación, el emprendimiento, el manejo de residuos, la comercialización y los equipos de trabajo. La educación y el emprendimiento se destacan como factores protectores, mejorando la capacidad de los agricultores para enfrentar desafíos y diversificar sus fuentes de ingreso. Por otro lado, el manejo de residuos y la comercialización pueden actuar como factores tanto de riesgo como protectores, dependiendo de las prácticas implementadas y la estabilidad del mercado.

Los equipos de trabajo y los símbolos de riesgo también son componentes cruciales en la gestión psicosocial. La disponibilidad y calidad de los equipos de trabajo afectan directamente la seguridad y eficiencia, mientras que la presencia adecuada de símbolos de riesgo puede prevenir accidentes y proteger la salud de los trabajadores. Además, factores como el apoyo social y las condiciones laborales favorables juegan un papel importante en la reducción del estrés y la mejora del bienestar psicológico.

Es imperativo que las intervenciones psicosociales en platanicultores incluyan programas de capacitación y apoyo emocional, fomenten la cohesión comunitaria y proporcionen herramientas para el manejo del estrés. La integración de estos factores en una estrategia holística de gestión psicosocial no solo mejora la calidad de vida de los agricultores, sino que también optimiza la productividad y sostenibilidad del cultivo de plátano en la región. Para lograr estos objetivos, es esencial la colaboración entre autoridades gubernamentales, organizaciones no gubernamentales y la comunidad agrícola, asegurando así un enfoque participativo y adaptado a las necesidades específicas de los platanicultores.

A manera de conclusión, la gestión psicosocial en los platanicultores de Herveo y Casabianca es fundamental para abordar los desafíos multidimensionales que enfrentan estas comunidades agrícolas. Los agricultores en esta región se encuentran en situaciones de vulnerabilidad debido a factores económicos, sociales y ambientales. La adopción de

un enfoque integral que aborde tanto las necesidades materiales como las emocionales y sociales es crucial para mejorar su bienestar y productividad.

Los estudios realizados han destacado la importancia de factores como la educación y el emprendimiento en la mejora de las capacidades de los agricultores para enfrentar desafíos y diversificar sus ingresos. Estas dimensiones actúan como factores protectores, promoviendo prácticas agrícolas más eficientes y sostenibles. Asimismo, el manejo adecuado de residuos y la comercialización efectiva son esenciales para asegurar ingresos estables y minimizar los riesgos asociados con la inestabilidad del mercado.

La disponibilidad y calidad de los equipos de trabajo, así como la correcta implementación de símbolos de riesgo, son elementos críticos en la protección de la salud y seguridad de los platanicultores. Las intervenciones psicosociales deben incluir programas de formación y apoyo emocional, fomentando la cohesión comunitaria y proporcionando herramientas para el manejo del estrés. Estas estrategias son esenciales para reducir los niveles de ansiedad y depresión, mejorar el bienestar psicológico y fortalecer la resiliencia comunitaria.

La gestión psicosocial en los platanicultores de Herveo y Casabianca requiere un enfoque holístico y participativo. La colaboración entre las autoridades gubernamentales, las organizaciones no gubernamentales y la comunidad agrícola es esencial para diseñar e implementar intervenciones efectivas. Al priorizar el bienestar emocional y mental de los agricultores, se puede contribuir significativamente a la sostenibilidad y el desarrollo integral de las comunidades rurales en el departamento del Tolima. Esto no solo mejora la calidad de vida de los agricultores, sino que también optimiza la productividad y asegura la viabilidad a largo plazo del cultivo de plátano en la región.

Referencias

Appiah-Boateng, S. (2020). *Land-use Conflicts and Psychosocial Well-being* [Tesis para optar por el grado de Doctorado en Filosofía]. Universitätsverlag Hildesheim. https://www.researchgate.net/profile/Sabina-Appiah-Boateng/publication/344070456_Land-use_Conflicts_and_Psychosocial_Well-being/links/621cc2b9579f1c041720d162/Land-use-Conflicts-and-Psychosocial-Well-being.pdf

Armas Cruz, M. A., y López Terrones, D. J. (2021). *Riesgos laborales y conocimiento sobre el uso de plaguicidas en agricultores*. Santa-2019.

Berry, R., Vigani, M., y Urquhart, J. (2022). Economic resilience of agriculture in England and Wales: a spatial analysis. *Journal of Maps, 18*(1), 70-78. https://doi.org/10.1080/17445647.2022.2072242

Brigance, C., Soto Mas, F., Sanchez, V., y Handal, A. J. (2018). The mental health of the organic farmer: psychosocial and contextual actors. *Workplace Health & Safety, 66*(12), 606-616. https://doi.org/10.1177/2165079918783211

Calle Díaz, L. (2019). Farmers, Forests and Cattle: Restoring Hope in Colombia's Degraded Landscapes (Doctoral dissertation, University of California, Santa Cruz). https://escholarship.org/content/qt33p376q5/qt33p376q5.pdf?v=lg

Carazo Vargas, E., y Valverde Valverde, E. (2012). *Significado Psicosocial de las Semillas y las Prácticas asociadas a ellas para Personas Campesinas Agroecológicas*. https://hdl.handle.net/10669/757

Contreras Valencia, K. V. (2019*). La percepción sobre el riesgo agroclimático en los agentes de la cadena del banano: elementos para la construcción de estrategias de adaptación al cambio climático.* https://hdl.handle.net/20.500.14625/30541

Cruz Amaya, N., González Atra, M. J., González Cárdenas, M. D. P., Parra Palacios, C. P., y Ramos Suárez, O. Y. (2021). La imagen y la narrativa como herramientas para el abordaje Psicosocial en escenarios de violencia. Departamento Cundinamarca, Bogotá. https://repository.unad.edu.co/handle/10596/15023

de los Santos, L. G. B., y Cárdenas, D. F. O. (2022). *Aplicación de la agricultura de precisión para mejorar las actividades de la cadena de valor en cultivos de plátano*. Junta Directiva Teinco, 23. https://investigacion.teinco.edu.co/wp-content/uploads/2024/03/Aplicacion-de-la-agricultura-de-precision-para-mejorar-las-actividades-de-la-cadena-de-valor-en-cultivos-de-platano.pdf

Dearmas Bermúdez, W. O. (2012). Análisis de los factores psicosociales que inciden en la productividad de los pequeños productores agropecuarios de la vereda de Tabacos Rubios corregimiento de Matitas (Riohacha-Guajira) [Tesis de grado para optar por el título de Psicólogo Social Comunitario]. Facultad de Ciencias Sociales y Humanas. Universidad Nacional Abierta ya Distancia UNAD). https://repository.unad.edu.co/bitstream/10596/2327/1/2007-04-03P-0001.pdf

Galvis, L. M., Gómez Jurada, D. P., y Rivero Silva, L. (2020). *Análisis de los Factores de Riesgo Psicosociales y su Incidencia en la Salud de los Trabajadores de la Secretaría de Agricultura de la Gobernación de Santander* (Doctoral dissertation, Corporación Universitaria Minuto de Dios).

García-Pineda, L. Y., y Bravo-Vallejos, N. D. (2022). Conocimientos, actitudes y prácticas sobre el uso de plaguicidas por agricultores en una zona rural de Copán Ruinas, Honduras, año 2019. *Medicas UIS, 35*(2). https://doi.org/10.18273/revmed.v35n2-2022005

Giaccio, G., Mastrangelo, M., Aparicio, V., Costa, J. L., y Laterra, P. (2020). Factores psicosociales que influyen en la intención de los tomadores de decisión agropecuarios de la Pampa austral de Argentina de conservar las franjas de vegetación ribereñas. *Papeles de Geografía.* 66. 85-102. https://doi.org/10.6018/geografia.422201

Gutiérrez Cano, L. F., Zartha Sossa, J. W., Orozco Mendoza, G. L., Suárez Guzmán, L. M., Agudelo Tapasco, D. A., y Quintero Saavedra, J. I. (2023). *Agricultural innovation system: analysis from the subsystems of R&D, training, extension, and sustainability. Frontiers in Sustainable Food Systems(7)* https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2023.1176366/pdf

Londoño Motta, Á. M. (2016). *Adopción potencial de alternativas biológicas por cultivadores de plátano del Quindío.* [Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de Doctora en Agroecología]. Facultad de Ciencias Agrarias, Doctorado Agroecología, Universidad Nacional de Colombia. https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/58300/2018-01-Angela_Maria_Londo%C3%B1o_Motta.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Malanski, P. D., Schiavi, S., y Dedieu, B. (2019). *Characteristics of "work in agriculture" scientific communities. A bibliometric review. Agronomy for Sustainable Development, 39*(4), 36. https://doi.org/10.1007/s13593-019-0582-2

Moya, S., Tirado, F., Espluga, J., Ciaravino, G., Armengol, R., Diéguez, J., Yuz, E., Benavides, B., Casal, J. y Allepuz, A. (2020). Dairy farmers' decision-making to implement biosecurity measures: A study of psychosocial factors. Transboundary and emerging diseases, 67(2), 698-710. https://doi.org/10.1111/tbed.13387

Ocampo Zambrano, B. A. (2019). *Calidad de vida de productores de plátano (Musa paradisiaca) que adoptan paquetes tecnológicos, en el Cantón El Carmen, Ecuador.* [Tesis de grado para optar por el título de Maestría en Innovación Agraria para el Desarrollo Rural] Escuela de Posgrado, Universidad Nacional Agraria La Molina. https://hdl.handle.net/20.500.12996/4002

Osorio Arias, J. H. (2021). Producción de plátano hartón Musa paradisiaca en el municipio de Mesetas-Meta, bajo técnicas agrícolas adaptadas a la zona y como modelo a implementar e impulsar la productividad agrícola familiar. [Tesis de grado para optar por el título de pregrado en Ingeniería Agronómica] Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad de La Salle. https://ciencia.lasalle.edu.co/ingenieria_agronomica/228?utm_source=ciencia.lasalle.edu.co%2Fingenieria_agronomica%2F228&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages

Posada-Pérez, N. M., y Parra-Salazar, M. N. (2020). Environment and Society Research Incubator: Participatory Action Research in a Socio-environmental Key. *Trilogía Ciencia Tecnología Sociedad, 12*(22), 158-180. https://doi.org/10.22430/21457778.1417

Pulido, F. R., y Beltrán Delgado, F. J. (2022). La Palma: Un volcán sin nombre y sin olvido. *Norte de Salud Mental, 18*(66), 11-21. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8427428.pdf

Reyes-Vélez, J. (2020). Percepciones de las diferentes técnicas de manejo de malezas en plátano de las zonas norte, centro y sur de Puerto Rico. Recinto Universitario de Mayagüez. https://hdl.handle.net/20.500.11801/2673

Roa Medina, S. V., y Alarcón Lozano, O. F. (2022). *Identificación de factores de riesgo psicosocial extralaboral en agricultores de la Vereda Mancilla en Facatativá*. Universidad ECCI. https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/2701

Cambronero Rodríguez, A. (2016). ¿Urbano o rural? ¿Dónde se encuentra la conexión? *Wimb Lu, 11*(2), 7-13. https://doi.org/10.15517/wl.v11i2.26148

Ruiz Perilla, D. L. (2019). *Investigación acción participativa con una comunidad de platanicultores para el procesamiento de plátano en el departamento del Casanare*. [Tesis de grado para optar por el título de pregrado en Ingeniería de Alimentos] Universidad de La Salle. https://hdl.handle.net/20.500.14625/33132

Sanchez, A., y Jimenez, C. (2023). Agricultural Strategies for Empowerment in the Elderly. *Journal of business and entrepreneurial studies, 7*(1). https://doi.org/10.37956/jbes.v7i1.319

Sari, F. R. Q., y Cevallos, E. M. C. (2022). Valor de marca Café: percepción del valor de marca desde la cognición a la convicción a partir de la experiencia del consumidor en el Carchi e Imbabura. *SATHIRI, 17*(2), 47-66. https://doi.org/10.32645/13906925.1130

Sarrin De Paz, J. F. (2023). *Influencia de los factores sociodemográficos en el riesgo de síndrome metabólico en adultos, Trujillo 2023*. Universidad César Vallejo. https://hdl.handle.net/20.500.12692/133336

Trujillo-Abella, I. A., y Orjuela-Yacué, C. F. (2020). Principales causas de muerte de agricultores en Colombia periodo 2010-2016. *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud, 52*(1), 41-49.

Valencia, R. A. (2016). Desarrollo de un modelo productivo con aplicaciones tecnológicas en el cultivo de plátano dominico hartón (Musa paradisiaca) en el municipio de Planadas Tolima para su comercialización en fresco. [Tesis de grado para optar por el título de pregrado en Ingeniería Agronómica] Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad de La Salle. https://hdl.handle.net/20.500.14625/18495

CAPÍTULO 3

APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LOS SUBPRODUCTOS DEL PLÁTANO PARA EL DESARROLLO DE MATERIALES COMPUESTOS BIOBASADOS

Resumen

El aprovechamiento integral de los subproductos del plátano representa una estrategia clave para promover la sostenibilidad en la industria agrícola y la fabricación de materiales. En este estudio, se procesaron racimos y pseudotallos de plátano (*Musa paradisiaca* L.) de cuatro variedades (Dominico, Hartón, Dominico Hartón y Africano), provenientes de los municipios de Casabianca y Herveo en el departamento del Tolima, para la obtención de almidón y fibras lignocelulósicas. Los almidones del racimo se aislaron mediante un método químico utilizando una solución de metabisulfito de sodio al 1,2 %, mientras que las fibras lignocelulósicas de las calcetas del pseudotallo se obtuvieron con una desfibradora mecánica. Por otro lado, los almidones y fibras de la coraza se obtuvieron mediante una secuencia de operaciones unitarias que incluyeron troceado, secado, molienda por cuchillas y tamizado. Se caracterizaron fisicoquímica, térmica, estructural y mecánicamente los subproductos obtenidos del racimo y pseudotallo de plátano. Además, se evaluaron las propiedades de tensión y la absorción de agua de los almidones termoplásticos provenientes de las cuatro variedades y dos orígenes, así como de diferentes tipos de materiales compuestos reforzados con fibra corta, calcetas en estructura tipo sándwich y fibra corta con calcetas en estructura tipo sándwich.

Palabras clave: almidón termoplástico, fibras lignocelulósicas, pseudotallo, calceta y coraza.

Abstract

The comprehensive utilization of plantain byproducts represents a key strategy for promoting sustainability in the agricultural industry and material manufacturing. In this study, plantain bunches and pseudostems (*Musa paradisiaca* L.) from four varieties (Dominico, Hartón, Dominico Hartón, and Africano), sourced from the municipalities of Casabianca and Herveo in the Tolima department, were processed to obtain starch and lignocellulosic fibers. The starches from the bunches were isolated using a chemical method with a 1.2% sodium metabisulfite solution, while the lignocellulosic fibers from the pseudostem sheaths were obtained using a mechanical defibrillator. On the other hand, the starches and fibers from the husks were obtained through a sequence of unit operations, including chopping, drying, blade milling, and sieving. The byproducts from the banana bunches and pseudostems were characterized physicochemically, thermally, structurally, and mechanically. Additionally, the tensile properties and water absorption of thermoplastic starches from the four varieties and two origins were evaluated, as well as different types of composite materials reinforced with short fibers, sheath-based sandwich structures, and short fibers with sheath-based sandwich structures.

Keywords: thermoplastic starch, lignocellulosic fibers, pseudostem, shim and shells.

Introducción

A nivel mundial, varios países contribuyen a la producción de plátano, ubicándose principalmente en zonas tropicales y subtropicales. Colombia ocupa el cuarto puesto, con una producción de 4.476.922 toneladas de racimos de plátano en 2020, en la que participaron los 32 departamentos del (MADR, 2021). Sin embargo, este cultivo no ha sido aprovechado integralmente, debido a que en el mejor de los casos, se han destinado los subproductos provenientes de la planta madre del plátano (pseudotallo, raquis, bellota, hojas y cáscara) para la alimentación animal y desarrollo de abonos orgánicos, siendo dos propósitos que generan un valor agregado reducido, desaprovechando el potencial de las macromoléculas disponibles en dichos tejidos como almidones, fibras lignocelulósicas y pectina para el desarrollo de nuevos productos transformados, como la elaboración de alimentos funcionales, tejidos para confección, aditivos alimentarios y materiales biodegradables y biobasados (Fekete et al., 2019; González et al., 2020; Zhang et al., 2020). En la última alternativa previamente mencionada, se puede obtener almidón termoplástico a partir del almidón disponible de la pulpa, cáscara y coraza del pseudotallo, considerando su mezcla con un plastificante como el glicerol, sorbitol e/o isosorbida a través del empleo de la técnica de procesamiento que permite modificar la estructura nativa de los gránulos de almidón, siendo empleada la extrusión (Agarwal,

2021; González et al., 2020). Sin embargo, sus propiedades mecánicas y su capacidad en la absorción de agua son limitados para su empleo como empaque y/o envase para alimentos (De Morais Teixeira et al., 2005). Por consiguiente, una alternativa para mitigar las limitantes identificadas en el almidón termoplástico (TPS), se puede continuar con su procesamiento mediante la incorporación de fibras lignocelulósicas cortas y/o largas provenientes de la cáscara, hojas y calcetas del pseudotallo como reforzamiento para la elaboración de materiales compuestos biobasados (Castañeda-Niño et al., 2021). Otros componentes de interés corresponden a la pectina disponible en la cáscara y la coraza del pseudotallo de plátano y la savia proveniente de las calcetas del pseudotallo, siendo materias primas que pueden otorgar un reforzamiento adicional del material compuesto biobasado (Basak et al., 2016; Chinnathambi et al., 2024; Islam e Islam, 2021; Mohapatra et al., 2009; Xie et al., 2023).

De acuerdo con lo anterior, en el presente capítulo se abordarán métodos para la extracción de harinas, almidones y fibras lignocelulósicas, considerando cuatro variedades de plátano (Dominico, Dominico Hartón, Hartón y Africano) y dos orígenes (Casabianca y Herveo). Además, se incluirá la caracterización mecánica, fisicoquímica, térmica, tecno-funcional y estructural de las materias primas obtenidas a partir de la biomasa del pseudotallo y el racimo. Finalmente, se abordará la elaboración y caracterización mecánica, térmica, fisicoquímica y estructural del almidón termoplástico (TPS) y del material compuesto biobasado, como alternativa para el desarrollo de un contenedor de alimentos.

Aprovechamiento de subproductos provenientes del plátano

Entre los coproductos o subproductos, se encuentran diferentes sustratos como los azucares, almidones, fibras lignocelulósicas, aceites, pectinas y ceras (Ferreira-Leitao et al., 2010; Mohanty et al., 2005), considerando a la agricultura un proveedor importante a partir de la presencia de los coproductos en diferentes partes de las plantas como semillas, frutas, tallos, pseudotallos, hojas, madera, bagazo, cañas y pastos (Mohanty et al., 2005). En el caso de la biomasa lignocelulósica, su composición se basa en la unión de la celulosa y hemicelulosa mediante la función adhesiva y rígida de la lignina. Al procesar este tipo de material, se recomienda implementar pretratamientos físicos, químicos y/o biológicos para aumentar la disponibilidad de la celulosa (Thomsen et al., 2014). A continuación, se reportan las características de la pulpa, cáscara, raquis y pseudotallo de plátano.

Pulpa de plátano: Es el subproducto de mayor interés para el consumo doméstico y agroindustrial. Entre los componentes disponibles en la pulpa, se ha identificado una humedad entre el 65 al 77 %, materia seca entre el 23 al 35 %, almidón entre el 18 al

22 %, mientras que otros componentes minoritarios se encuentra pectina, fibra y proteína que no supera el 12 % (Melo-Sabogal et al., 2015). La macromolécula de mayor importancia es el almidón, presentando unas formas ovaladas alargadas con algunas terminaciones irregulares. En el caso de los gránulos de almidón de banano Gros Michel, sus dimensiones presentan un ancho entre 10 a 20 µm y una longitud entre 35 a 70 µm, mientras que los almidones de los plátanos Dominico hartón y FHIA 20 presentan un ancho de 20 a 30 µm y 18 a 32 µm, y un largo de 50 a 65 µm y 39 a 75 µm, respectivamente. En cuanto a la relación amilosa/amilopectina, se reportó 22,76/77,24 en el Gros Michel, 31,12/68,88 en el Dominico hartón y 28,58/74,42 en FHIA 20 (Chavez-Salazar et al., 2017). Siendo la amilosa un polímero constituido por glucosas enlazadas, los almidones regulares presentan valores cercanos al 20 % (Janssen y Moscicki, 2009), siendo las musáceas una fuente de almidón con un aporte relevante de amilosa. Debido a su contenido de amilosa con valores cercanos al 30 %, la mayoría de las especies de plátanos y bananos logran temperaturas de gelatinización a partir de 70 °C y hace parte del grupo de almidones resistentes a acciones enzimáticas (Hoyos-Leyva et al., 2012).

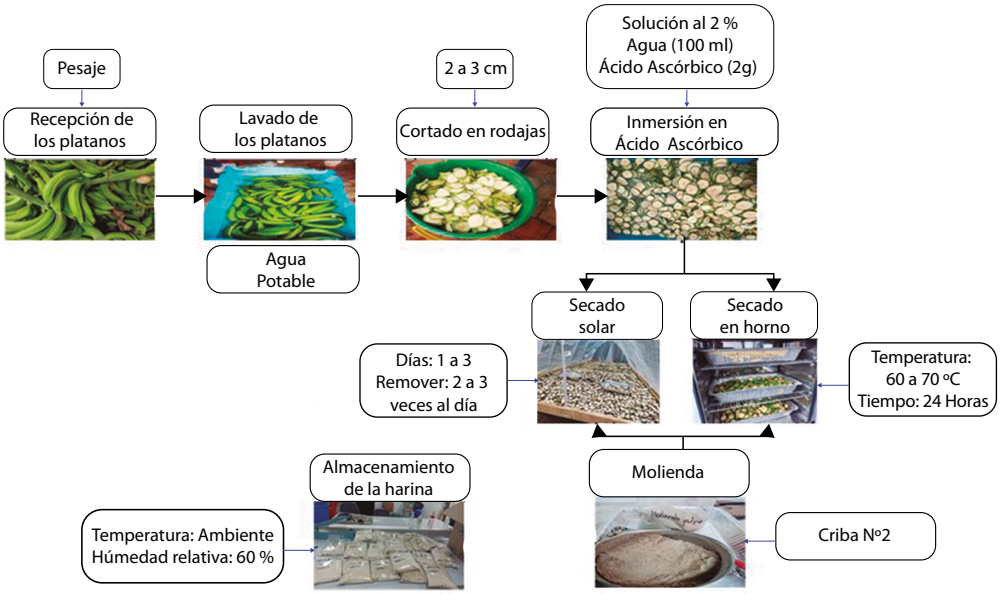
Cáscara de plátano: *La composición fisicoquímica de la cáscara verde, se encuentra un* contenido de almidón del 3 al 9 %, 6 al 9 % de proteína cruda, 43,2 a 49,7 % de fibra y ácidos grasos (Melo-Sabogal et al., 2015). En la composición macromolecular de las fibras, la celulosa participa en un 7,6 a 9,6 %, 6,4 a 9,4 % de hemicelulosa, 6 a 12 % de lignina y 10 a 21 % de pectina. Desde el inicio de la maduración de la fruta, el almidón y la hemicelulosa contenidos en la cáscara se degrada en azucares reductores, mientras que la presencia de proteína y lípidos presentan un leve incremento (Mohapatra et al., 2009). A parte de la pulpa, la cáscara también aporta almidón, diferenciándose con el menor contenido de amilosa presente en la estructura de los gránulos (Nasrin et al., 2015).

Pseudotallo de plátano: la presencia de agua se encuentra entre el 90 al 95 %, el contenido de fibra lignocelulósica se encuentra entre 1,6 al 8 % en base húmeda y la diferencia restante corresponde al parénquima, presentándose con valores hasta del 4 % (Castañeda-Niño et al., 2024; Mamun et al., 2015; Robinson y Galán, 2010), sin embargo, Aziz et al., 2011, reportan un contenido de fibras lignocelulósicas de 29,9 % en base seca. Otra macromolécula que se encuentra en esta parte de la planta, específicamente en la coraza del pseudotallo, es el almidón (Mohapatra et al., 2009; Subagyo y Chafidz, 2018), encontrando un contenido del 12,81 % con respecto al peso fresco de la coraza, presentó una menor estabilidad térmica con respecto a los gránulos provenientes a la pulpa y cáscara de plátano.

Metodologías requeridas para el desarrollo de almidón termoplástico (TPS) y material compuesto biobasado a partir de plátano

Extracción de almidones provenientes de la pulpa: inicialmente se realizó el corte de los dedos correspondientes a los racimos de plátano, realizándose en el mismo día de cosecha para evitar el avance de la maduración del fruto climatérico, evitando la hidrolisis del almidón en azucares reductores. El tajado se realizó mediante el uso de un cuchillo para aumentar el área de exposición y reducir el tiempo de secado por convección forzada, empleando una temperatura de 70 °C durante 24 horas. Al lograr una humedad inferior del 8 % de los chips resultantes, se obtuvo su respectiva harina mediante el uso de un molino de cuchillas, empleando una criba con aberturas de 0,5 mm, seguido de un tamizaje, usando un tamiz 100/fondo según la serie Tyler, obteniendo partículas con diámetros inferiores a 150 µm (García-Solís et al., 2018; Giraldo Toro et al., 2015) (Figura 1).

Figura 1. Obtención de harina proveniente del racimo de plátano

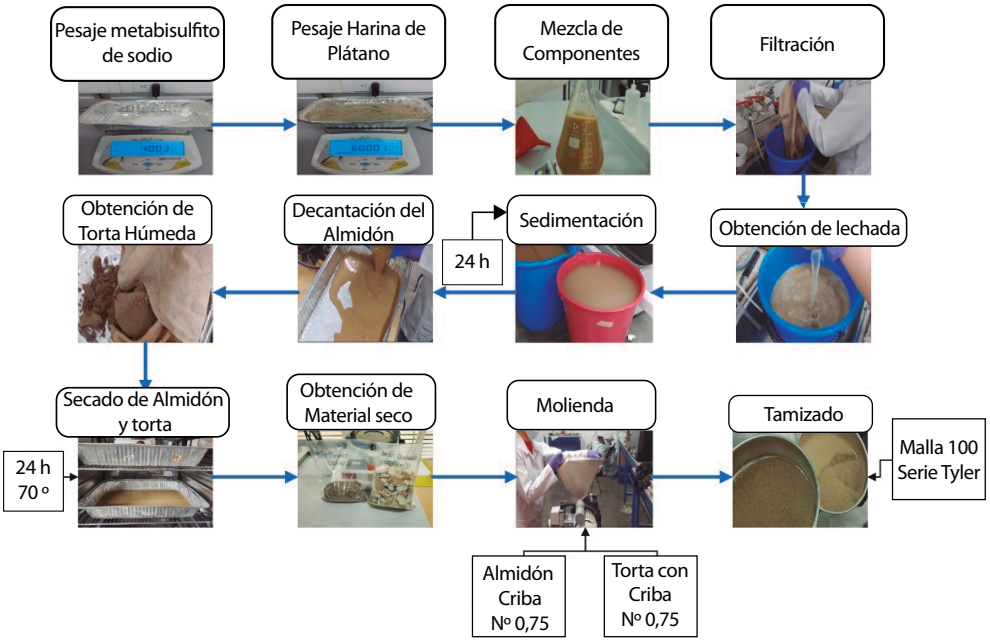


Fuente: elaboración propia

Al disponer de la harina de plátano obtenida de la pulpa, se realizó la extracción de almidón mediante la inmersión de la harina en una solución de metabisulfito de sodio al 1,2 %. El proceso se llevó a cabo con agitación constante (500 a 800 r.p.m.) a temperatura ambiente durante un período de 30 a 90 minutos. La mezcla resultante pasó a través de

una centrífuga para separar la lechada (almidón + agua) y el bagazo (fibras + parénquima). La lechada resultante de la filtración se almacenó en recipientes de 12 L durante 24 horas para lograr la sedimentación del almidón, seguido de la decantación del sobrenadante, obteniendo la pasta de almidón (estado húmedo). La pasta de almidón se sometió a secado por convección forzada, empleando una temperatura de 60 °C durante 24 horas, obteniendo almidón aglomerado. Con el propósito de reducir y estandarizar el tamaño de partícula del almidón, se empleó un molino de cuchillas con una criba de 0,25 mm, seguido del tamizaje con el empleo de la malla 100/fondo según la serie Tyler, obteniendo partículas con diámetros inferiores a 150 µm (De La Torre-Gutiérrez et al., 2007) (Figura 2).

Figura 2. Extracción de almidón proveniente del racimo de plátano

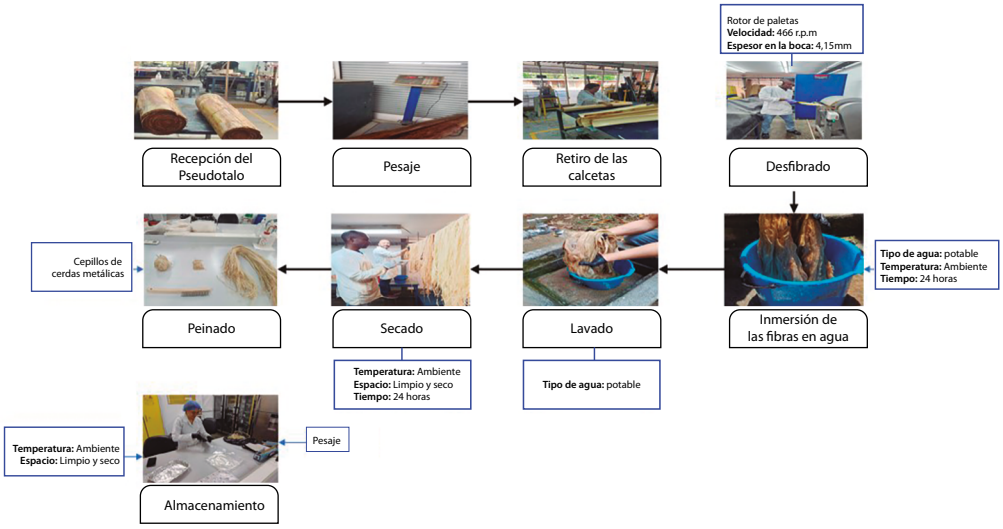


Fuente: elaboración propia

Extracción de fibras lignocelulósicas, savia y almidón del pseudotallo de plátano: la presente actividad se realizó en el mismo día de la cosecha del pseudotallo para evitar procesos de descomposición en los respectivos tejidos. Inicialmente, se debe retirar manualmente cada una de las calcetas y coraza, seguido del desfibrado de cada calceta mediante el empleo de una desfibradora mecánica, empleando un rotor de paletas con una velocidad de 5000 r.p.m. y una distancia de desfibrado de 10 mm (Rodriguez, 2014). Al terminar el desfibrado se obtienen fibras lignocelulósicas largas y la torta, requiriendo de pretratamientos para el acondicionamiento de los dos subproductos resultantes. En el caso de las fibras lignocelulósicas, se deben someter a un lavado con agua destilada

para retirar algunos residuos de savia y parénquima que puedan quedar retenidos, seguido del secado por convección forzada, empleando una temperatura de 60 °C durante 12 horas y finalmente se almacenará en bolsas de polietileno de alta densidad (HDPE) y almacenados en un lugar con ausencia de luz (Müssig, 2010; Subagyo y Chafidz, 2018). En el caso de la torta, se realizó una compresión manual para separar, obtener y almacenar la savia en bolsas de HDPE, seguido de su almacenamiento en condiciones de congelación. En el momento de obtener la mancha de plátano, se realizó el secado de la savia mediante el empleo de un horno de convección forzada con una temperatura de 70 °C durante 24 horas (Figura 3).

Figura 3. Extracción de las fibras provenientes de las calcetas del pseudotallo de plátano



Fuente: elaboración propia

En el caso de la coraza del pseudotallo de plátano, se sometió a un troceado, obteniendo una presentación en "chips" para iniciar su secado por convección forzada (70 °C durante 24 horas). Posteriormente, se procedió a su molienda en un molino de cuchillas utilizando una criba de 2 mm. La harina resultante se tamizó para separar las fibras lignocelulósicas cortas y el almidón, empleando un tamiz número 100 según la serie Tyler (Castañeda-Niño et al., 2024).

Modificación superficial de las fibras lignocelulósicas mediante la técnica de explosión por vapor: la modificación de las fibras del pseudotallo de plátano se realizaron mediante la metodología de explosión por vapor, donde se introdujeron las fibras en una autoclave sometiéndolas a una temperatura de 120 °C durante 30 minutos, seguido de una descompresión. Después, las fibras se sometieron a un secado y empacado (Castañeda-Niño et al., 2024).

Caracterización fisicoquímica, tecno-funcional, térmica, estructural y mecánica de las materias primas provenientes del racimo y pseudotallo de plátano

Morfología y tamaño de partícula: se emplearon las técnicas de granulometría laser y la microscopia electrónica de barrido (SEM). Los almidones provenientes del racimo y la coraza del pseudotallo de plátano previamente molidos y tamizados se sometieron a un análisis por granulometría laser conforme a la Norma ISO 13320, en un analizador de tamaño de partícula con tecnología de difracción de rayo láser (Mastersizer 2000 de Malvern Instruments con accesorio Hydro 2000MU). Mientras que el análisis morfológico de las muestras se realizó en una máquina JEOL modelo JSM 6490 LV. Las muestras fueron cubiertas de una capa de oro paladio con el propósito de evitar la acumulación de carga eléctrica durante el ensayo. Se empleó 1 mg de cada almidón para colocarse sobre una cinta de carbón. Las imágenes obtenidas fueron a partir del método de electrones retrodispersados con una potencia de aceleración de 20 kV y un vacío de 30 Pa en la cámara del microscopio, logrando magnificaciones de 500 y 1000 x (Castañeda Niño, 2012).

Análisis proximal: este análisis se conformará de cinco pruebas fundamentales, determinando la cantidad de proteína, cenizas, humedad, fibra y lípidos. La determinación de proteínas se realizará siguiendo la norma ISO 1871. La ceniza se determinará siguiendo la norma ISO 2171. El porcentaje de humedad se realizará siguiendo la norma GTC 1. La determinación de lípidos y fibra cruda se realizará siguiendo la Norma Técnica Colombiana 668 (NTC 668, 1973).

Determinación de pH: inicialmente, se calibró un medidor de pH con las soluciones tampón pH 4,0 y pH 7,0. Se emplearon 20 g de almidón (b.s.) y se mezclará con 100 mL de agua destilada (previamente hervida para eliminar el CO_2) durante 15 minutos mediante una agitación magnética. La solución de almidón se filtrará mediante el uso de un papel Whatman #1 siendo soportado por un embudo para la medición del pH (Kumar et al., 2019a).

Índice de absorción de agua, solubilidad en agua y poder de hinchamiento (IAA, ISA y PH): para la evaluación de las propiedades tecno-funcionales de las muestras de harina (índice de absorción de agua, índice de solubilidad en agua y poder de hinchamiento), 0,65 g de muestra y 7,8 mL de agua destilada serán homogeneizadas en vórtex (Vortex Classic Advanced Mixer) en un tubo falcon de 15 mL durante 30 s y puestos en baño maría (Memmert WNB14) durante 30 min a 30°C. La muestra resultante se centrifugará (centrífuga Universal 320R) a 5200 rpm, durante 10 min a una temperatura de 20 °C.

El sobrenadante será llevado a una caja Petri y secado a 105°C durante 24 h (Padhi y Dwivedi, 2022). El índice de absorción de agua, índice de solubilidad en agua y poder de hinchamiento serán calculados tal como se expresa a continuación:

$$IAA = \frac{Peso\ del\ gel\ (g)}{Peso\ de\ la\ muestra\ (g)}$$ Ecuación 1

$$ISA = \frac{Peso\ solubles\ (g) x\ Vx\ 10}{Peso\ de\ la\ muestra\ (g)}$$ Ecuación 2

$$PH = \frac{Peso\ del\ gel\ (g)}{Peso\ muestra\ (g) - Peso\ solubles\ (g)}$$ Ecuación 3

Contenido de amilosa: el contenido de amilosa se determinará por el método colorimétrico de yodo utilizando un espectrofotómetro UV-Vis (UV-2550, Shimadzu, Japón) a una longitud de onda de 620 nm, empleando muestras previamente desengrasadas (Sun et al., 2011). Inicialmente la muestra se desengrasará sumergiéndola en acetona grado analítico por 10 minutos. Se pesará 0.1 g de muestra en un matraz de 100 mL, se agregará 1mL de etanol 95 % p/v y se adicionará 9 mL de hidróxido de sodio 1.0 M y se llevará a baño María por 30 minutos. Posteriormente se dejará enfriar y se completará el aforo con agua destilada. Se tomará 1mL de esta solución y se le adicionará 200 µl de ácido acético 1.0 M y 400 µL de solución de Lugol. Se dejará reaccionar por 20 minutos en la oscuridad y se completará el volumen con 18,4 mL de agua destilada. Se registrará la absorbancia a una longitud de onda de 620 nm y el contenido de amilosa se calculará con base a la curva de calibración previamente elaborada (Giraldo Toro et al., 2015).

Análisis Termogravimétrico (TGA): con el fin de estudiar la estabilidad térmica de los almidones, se empleará un equipo de análisis termogravimétrico (TA Instruments, Q50). El peso de las muestras se mantendrá entre 5.0 a 8.0 mg. Cada muestra se someterá a un intervalo de temperatura desde 25 hasta 600 °C a una rapidez de calentamiento de 10 °C/minuto, bajo una atmosfera de nitrógeno (grado 5.0 analítico) con un flujo de calor de 50 ml/min. Los valores obtenidos serán el porcentaje de humedad, pérdida de peso y la temperatura de descomposición a partir de la derivada de la curva TGA (Rodríguez, 2014).

Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC): se emplearán 10 mg en cada muestra (almidones), siendo previamente acondicionadas a una humedad relativa del 50 % y temperatura de 23 °C y evaluados mediante un calorímetro (TA Instruments, Q20). Cada una de las muestras se ubicarán dentro de una capsula hermética de aluminio, se sellarán y se colocarán dentro de la cámara térmica del DSC. En un ambiente inerte con

presencia de nitrógeno, se realizará un primer ciclo de calentamiento desde temperatura ambiente hasta 90 °C para borrar la historia térmica, seguido de una isoterma de 90 °C durante 5 minutos. Después se presentará un ciclo de enfriamiento desde 90 °C hasta -60 °C y una isoterma de -60 °C durante 5 minutos. Finalmente, se realizará un ciclo de calentamiento de -60 a 250 °C con el fin de determinar la temperatura de transición vítrea (Tg), la temperatura de fusión (Tm) y su entalpia (ΔH) en las respectivas muestras. La rapidez de calentamiento fue de 10 °C/minuto (Agbor et al., 2011).

Ensayo de tensión: se determinaron las propiedades de tensión de las fibras (nativas y modificadas) mediante la norma ASTM D3822. Inicialmente se realizó un secado de las probetas a 70 °C durante 24 horas, seguido de su acondicionamiento con una humedad relativa (HR) del 50 % y a una temperatura de 23 °C durante 48 horas. El diámetro aparente de las muestras se determinó mediante el empleo de un estereoscopio y el software de análisis de imágenes. Se empleó una maquina universal de ensayos (Tinius Olsen, H50Ks, USA), con los siguientes parámetros de análisis: 12,7 mm de longitud entre mordazas, una velocidad de desplazamiento de la mordaza móvil de 4,0 mm/min, la longitud de la muestra fue 1,5 veces más larga que la distancia entre las mordazas y se implementó un soporte de cartón para contener la fibra alineada entre las mordazas y protegerla ante posibles fracturas o torsiones (Gañán et al., 2008; Jayaprabha et al., 2011). Se obtuvieron los valores de la resistencia máxima a la tensión (σ_{max}), la deformación en el punto de rotura (ε) y el módulo de elasticidad (E).

Procesamiento para la obtención de materiales biobasados provenientes del plátano

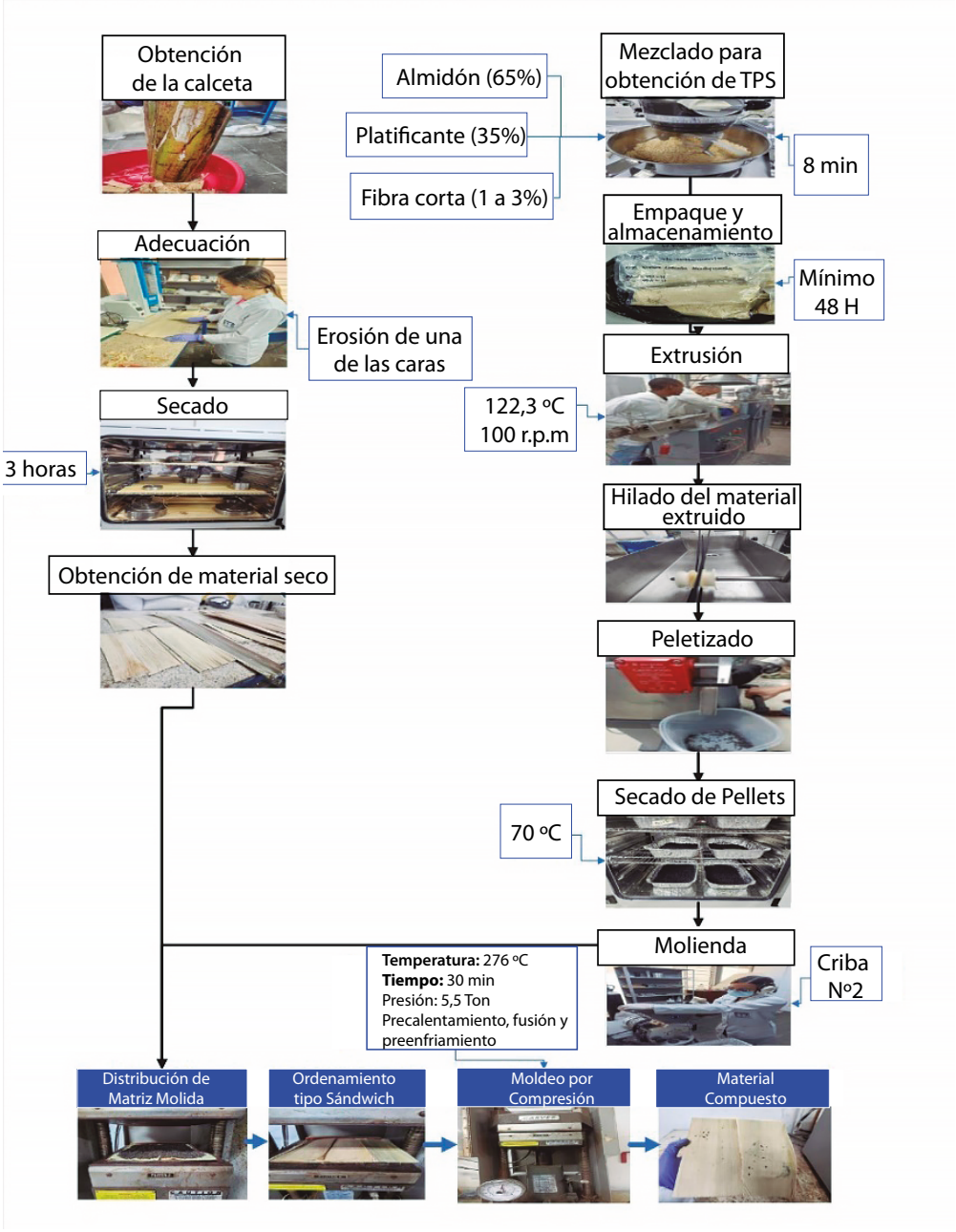
A partir de los almidones y fibras lignocelulósicas extraídas del racimo, coraza y calcetas del pseudotallo de plátano, se pueden elaborar materiales biodegradables y biobasados como el almidón termoplástico y el material compuesto biobasado.

Almidón termoplástico: inicialmente se debe estandarizar el tamaño de partícula del almidón mediante el empleo de un tamiz 100/fondo según la serie Tyler para lograr diámetros de los gránulos de almidón menores de 150 µm para lograr una menor variación de las propiedades del almidón termoplástico a obtener y retirar cualquier impureza proveniente de la harina. Seguido a ello, el almidón tamizado se debe someter a secado empleando una temperatura de 60 °C durante 24 horas para evitar la formación de burbujas durante su procesamiento a alta temperatura. La humedad del almidón seco debe

encontrarse en valores inferiores al 7 %. La mezcla almidón/plastificante se basa en la adición del plastificante (glicerol, sorbitol o isosorbida) debe ser del 35 % mientras que el almidón participa en un 65 %, sometiéndose posteriormente a su empacado en un recipiente o bolsa hermética durante 48 horas para facilitar la humectación del granulo de almidón con el plastificante, permitiendo facilitar el procesamiento por extrusión. Al cumplir el tiempo de almacenamiento, su procesamiento para la obtención del almidón termoplástico se basa en el empleo de una temperatura de extrusión promedio de 132 °C, velocidad de tornillo de 100 r.p.m. y una boquilla de cordón para la obtención de los respectivos pellets. Dicho material puede ser nuevamente procesado por la misma técnica de procesamiento u otras como el moldeo por compresión, moldeo por inyección o moldeo por termoformado para otorgar una forma de un empacado determinado (Mina Hernandez, 2021) (Figura 4).

Material compuesto biobasado: la conformación de este tipo de material se basa en incorporar fibras lignocelulósicas cortas y/o largas en la matriz (almidón termoplástico) mediante la extrusión, empleando mezclas de TPS (almidón de plátano y plastificante) con un contenido máximo de fibras cortas del 3 % (2 % de las fibras cortas nativas de las calcetas y 1 % de las fibras de la coraza), ya que si se sigue aumentando el contenido de fibras en la matriz, la extrusora supera el límite del torque permitido para el procesamiento. La orientación de las fibras cortas en este tipo de material compuesto es aleatoria y se pueden emplear fibras modificadas mediante la explosión por vapor. Otro tipo de material compuesto que se puede obtener a partir de los subproducto del plátano es a partir del empleo de las calcetas del pseudotallo, las cuales deben ser acondicionadas previamente mediante el retiro de la epidermis de la cara interna de las calcetas permitiendo exponer las celdas vacías que constituye las calcetas, seguido de su secado a 60 °C durante 3 horas, continuando con la aplicación de la matriz en la cara tratada de la calceta y encima de la matriz se apoya una segunda calceta tratada (organización tipo sándwich), para ser posteriormente procesada mediante el empleo del moldeo por compresión, requiriendo una temperatura de procesamiento de 140 °C en ambas placas de calentamiento y una presión de 5,5 toneladas durante un tiempo de 20 minutos y finalizando con su enfriamiento durante 10 minutos manteniendo la presión de las placas (ver figura 4). Las láminas de material compuesto resultantes pueden destinarse como materia prima para el moldeo por termoformado, requiriendo emplear la misma temperatura de procesamiento previamente mencionado, un molde con las dimensiones requeridas y aplicadas en el material compuesto y la presión requerida para obtener el envase y/o empaque requerido (Adeniyi et al., 2019; Venegas et al., 2022).

Figura 4. Desarrollo del almidón termoplástico y material compuesto biobasado



Fuente: elaboración propia

Extracción de fibras lignocelulósicas y almidones según variedad y origen

En el proceso de extracción de los pseudotallos pertenecientes a las cuatro variedades y dos orígenes, se logró identificar la participación de la biomasa de las calcetas y la coraza, numero de calcetas por pseudotallo, rendimiento de la harina de la coraza (ver tabla 1) y los rendimientos de fibras y almidón proveniente del pseudotallo (ver tabla 2). La mayor participación de biomasa se evidencio en la calceta (73,52 al 80,81 %) con respecto a la coraza (19,18 al 26,48 %) a pesar del alto contenido de agua presente en ambos subproductos con valores entre el 83,0 al 94,6 % (Akpabio et al., 2012; Balakrishnan et al., 2021; Cadavid et al., 2016; Castañeda-Niño et al., 2024; Daza Serna et al., 2016). El número de calcetas puede variar entre 10 a 17 unidades (Tabla 1), resaltando el mayor valor en la variedad Hartón, mientras que la variedad Africano generó el menor número de calcetas, siendo comportamientos similares en ambos orígenes, respectivamente, sin embargo la variedad Dominico proveniente de Herveo, solamente reporto un bajo número de calcetas, indicando que las condiciones agroclimáticas del origen pueden influir en el número de calcetas producidas en el pseudotallo (Jayaprabha et al., 2011). De igual forma, es adecuado identificar una variedad que genere el menor número de calcetas a procesar en cada pseudotallo y se genere un rendimiento de extracción de fibras adecuado, con el propósito de lograr un menor costo de operación.

Tabla 1. Subproductos del pseudotallo según la variedad y origen.

Municipio	Variedad	Subproductos del pseudotallo (%)			
		Coraza[1]	Calcetas[1]	# calcetas	Coraza seca[2]
Casabianca	Dominico	20,29 + 1,44	79,71 + 1,44	13,33 + 1,53	8,97 + 1,81
	Hartón	22,12 + 4,79	77,88 + 4,79	15,67 + 2,08	8,61 + 3,73
	Dominico Hartón	22,64 + 6,60	77,37 + 6,60	14,33 + 2,31	8,51 + 1,82
	Africano	26,48 + 12,28	73,52 + 12,28	10,67 + 0,58	10,74 + 6,40
Herveo	Dominico	21,47 + 1,52	78,53 + 1,52	11,67 + 0,58	11,47 + 1,45
	Hartón	20,01 + 0,70	79,99 + 0,70	15,00 + 0,00	9,96 + 1,91
	Dominico Hartón	20,29 + 1,66	85,11 + 8,23	12,67 + 0,58	10,95 + 7,19
	Africano	19,41 + 3,19	80,81 + 3,44	11,67 + 0,58	9,16 + 1,43

Fuente: elaboración propia

Considerando el alto contenido de agua en las calcetas y corazas, las primeras se sometieron a un desfibrado mecánico, logrando el retiro de las fibras lignocelulósicas largas, presentando un rendimiento de extracción entre el 0,86 al 1,97 % con respecto al peso de las calcetas, identificando a las variedades Dominico (Casabianca) y Dominico Hartón (Herveo) como las fuentes con mayor aporte de las fibras largas (ver tabla 2), siendo valores inferiores a lo encontrado en un pseudotallo de plátano variedad Dominico hartón con un rendimiento del 2,20 % (Castañeda-Niño et al., 2024). En el caso de la coraza, se realizó su separación manual de las calcetas, seguido del troceo en forma de chips, secándolos y moliéndolos para obtener harina de la coraza con un rendimiento entre el 8,51 al 11,47 % con respecto a la coraza fresca. Dichas harinas fueron tamizadas, logrando separar almidón y fibras cortas entre el 6,34 al 9,24 % y el 2,00 al 2,94 %, respectivamente, evidenciando el mayor rendimiento en la obtención de almidón en la variedad Dominico (Herveo), Dominico Hartón (Herveo) y Africano (Casabianca), mientras que esta última variedad, otorgo la mayor proporción de fibras cortas provenientes de la coraza.

Tabla 2. Rendimiento en la extracción de fibras y almidón en el pseudotallo.

Municipio	Variedad	Rendimiento (%)		
		Fibras (co)[2]	Almidón (co)[2]	Fibras (ca)[4]
Casabianca	Dominico	1,99 + 0,35	6,96 + 1,49	1,97 + 0,11
	Hartón	2,27 + 0,76	6,34 + 3,01	1,57 + 0,32
	Dominico Hartón	2,49 + 0,57	6,27 + 1,60	1,59 + 0,07
	Africano	2,94 + 1,80	7,81 + 4,62	1,31 + 0,13
Herveo	Dominico	2,23 + 0,33	9,24 + 1,30	1,34 + 0,10
	Hartón	2,83 + 0,37	7,13 + 1,69	0,97 + 0,62
	Dominico Hartón	2,64 + 1,48	8,32 + 5,74	1,67 + 0,96
	Africano	2,77 + 0,37	6,39 + 1,44	0,86 + 0,42

Fuente: elaboración propia

Por otra parte, la pulpa y la cáscara provenientes del racimo de plátano al ser aprovechadas para la obtención de la harina y el almidón, se reportaron las masas en fresco, el contenido de materia seca, el rendimiento de almidón obtenido y la masa de almidón obtenida en un racimo. Al disponer de los tres racimos de cada variedad y municipio, se identificaron mayores masas en las variedades provenientes de Casabianca (Tabla 3) con valores entre 36,55 a 48,70 Kg mientras que las correspondientes a Herveo entre 20,70

a 30,70 Kg. Mientras que el contenido de materia seca, las variedades de Herveo registraron valores entre el 27,12 al 35,75 %, diferenciándose de las variedades originarias de Casabianca logrando valores entre el 15,18 al 23,53 %, siendo valores adecuados en los racimos de plátano, ya que Dufour et al. (2009), reportó contenidos de materia seca en diferentes variedades de plátano entre 18 al 45 %. Lo anterior posiblemente indica que los racimos de plátano desarrollados en Casabianca presentaron mayor capacidad en la retención de agua. En cuanto al rendimiento en la extracción del almidón, la mayoría de las variedades presentaron valores por encima del 80 %, siendo adecuado según lo reportado por Ramírez-Cortes et al., 2016, al realizar la extracción del almidón de la pulpa de plátano. La variedad que generó mayor rendimiento en la extracción de almidón fue Dominico (Casabianca) con un rendimiento del 87,12 % mientras que la variedad que presentó el menor rendimiento de almidón fue el Dominico hartón (Herveo). Sin embargo, el análisis con mayor precisión para relacionar las variedades con mayor producción de almidón se basa en considerar la masa del racimo en fresco, materia seca y el rendimiento de almidón para establecer la cantidad de almidón producido por cada racimo. En ese caso, las variedades de Dominico y Dominico hartón provenientes de Casabianca presentaron la mayor cantidad de almidón por cada racimo con valores de 2,50 y 2,57 Kg, respectivamente, seguido de las variedades previamente mencionadas pertenecientes a Herveo con valores de 2,46 y 2,39 Kg, respectivamente.

Tabla 3. Características del racimo según la variedad y origen.

Municipio	Variedad	Características del fruto					
		Peso fresco (Kg)	Peso seco (Kg)	M.S. (%)	Almidón (%)	Almidón (Kg)	Cantidad de almidón por racimo (Kg)
Casabianca	Dominico	36,55	8,6	23,53	87,12 + 6,17	7,49	2,50
	Hartón	41,50	6,3	15,18	82,93 + 2,31	5,22	1,74
	Dominico Hartón	48,70	9,5	19,51	81,15 + 3,42	7,71	2,57
	Africano	47,95	8,16	17,02	85,38 + 0,78	6,97	2,32
Herveo	Dominico	30,70	9,2	29,97	80,12 + 3,35	7,37	2,46
	Hartón	20,70	7,4	35,75	81,36 + 0,67	6,02	2,01
	Dominico Hartón	30,70	9,2	29,98	77,87 + 0,48	7,16	2,39
	Africano	23,6	6,4	27,12	83,58 + 3,14	5,35	1,78

Fuente: elaboración propia

Considerando el análisis anterior e implementado en los subproductos obtenidos en el pseudotallo (Tabla 4), se logró identificar menor obtención de biomasa en los pseudotallos (625,89 a 867,44 g) con respecto a lo encontrado en los racimos (1740 a 2500 g), reportando mayor cantidad de almidón, savia y fibras en las variedades Dominico y Dominico hartón pertenecientes a Herveo con un rendimiento de la biomasa del 4,90 y 4,87 %, respectivamente, siendo valores acordes a los reportados en la cadena del fique para la obtención de las fibras largas con valores entre el 4 al 5 % (Gómez et al., 2020; Ovalle-Serrano et al., 2018).

Caracterización fisicoquímica, tecno-funcional, térmica y estructural de almidones y fibras lignocelulósicas provenientes de la pulpa y cáscara de plátano

Al disponer de los almidones y fibras lignocelulósicas de racimo y coraza provenientes de cuatro variedades (Dominico, Dominico hartón, Hartón y Africano) y dos orígenes (Casabianca y Herveo), se realizó su caracterización mediante el análisis proximal, la granulometría, el pH, indice de solubilidad en agua (ISA), índice de absorción de agua (IAA), poder de hinchamiento (PH), contenido de amilosa, espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR), el ensayo de tensión, calorimetría de barrido diferencial (DSC), análisis termogravimétrico (TGA) y la microscopia electrónica de barrido (SEM) (ver tablas 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10).

Morfología y tamaño de partícula: considerando la disponibilidad de los almidones de plátano provenientes del racimo y la coraza, se identificaron diferentes formas en las estructuras de los gránulos, reportando geometrías semiesféricas, lenticulares, elípticas, ovaladas, oblongas y acampanadas, sin embargo, en las muestras provenientes de la coraza, sus terminaciones presentaron mayores irregularidades y/o asimetría, relacionando posibles fracturas para su obtención (ver figura 5). La superficie de los gránulos provenientes del racimo presentó un mayor aspecto liso y suave con un reducido contenido de gránulos con parénquima adherido, relacionando posiblemente los gránulos provenientes de la cáscara, ya que es el tejido que contiene mayor proporción de savia, mientras que los gránulos de almidón provenientes de la coraza también presentaron un comportamiento superficial similar. Las características dimensionales y superficiales fueron similares en todas las variedades de plátano considerando los dos orígenes. Ramirez-Cortes et al., 2016 y Torres-Vargas et al., 2023, mencionaron que la existencia de superficies lisas y densas en los gránulos de almidón se puede relacionar con la existencia de la resistencia a la hidrólisis enzimática.

En cuanto al tamaño de los gránulos, se identificó un mayor tamaño en las muestras de la coraza con valores en su diámetro longitudinal entre 28 a 39 µm y su diámetro

transversal entre 15 a 21 µm, considerando una presencia considerable de parénquima y fibras lignocelulósicas, mientras que en los almidones provenientes del racimo se encontraron valores entre 15 a 25 µm y 9 a 15 µm, respectivamente. Según lo anterior, se evidencio cambios en los tamaños de los gránulos según el tejido del plátano en donde se almacena el almidón, mientras que las variedades y el origen presentaron una baja relación con dicha diferenciación. Šárka et al., 2023, reporto que la variedad Dominico-Hartón presentó formas alargadas y su tamaño se encontró entre 50 a 65 µm en el largo mientras que el ancho se encontró entre 20 a 30 µm, siendo superior a lo reportado en los dos orígenes del Tolima. Sin embargo, a pesar de no encontrar diferencias pronunciadas entre las variedades, los gránulos de almidón provenientes de la pulpa y la coraza con mayor tamaño fueron los provenientes de la variedad hartón origen Casabianca, mientras que los gránulos de menor tamaño pertenecieron a la variedad Hartón origen Herveo (ver tabla 5). Los almidones de gránulos pequeños tienen propiedades únicas debido a una mayor afinidad por el agua, una mayor relación superficie-volumen y un bajo coeficiente de sedimentación, mientras que mayores tamaños de gránulo de almidón, sean un ingrediente importante en productos alimenticios de bajo índice glucémico que pueden ser utilizado para alimentación humana y animal (Nasrin et al., 2015). Entre las impurezas identificadas en las muestras provenientes de la coraza se encontraron fragmentos de fibras lignocelulósicas con diámetros entre 2,96 a 4,02 µm (ver tabla 5).

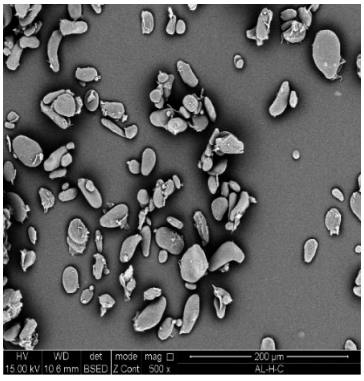
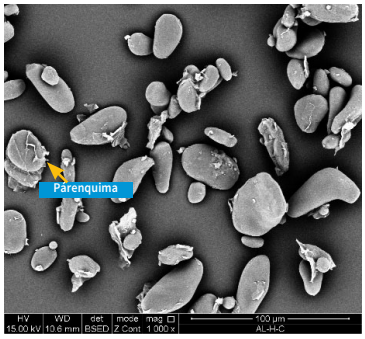
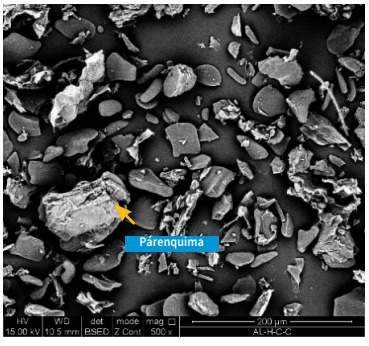
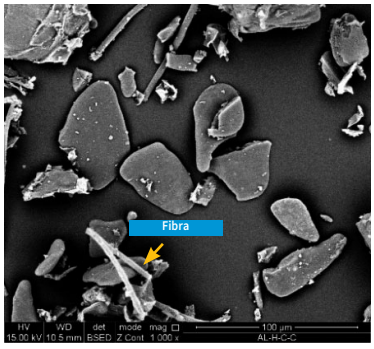
Tabla 4. Aprovechamiento de la biomasa del pseudotallo y racimo de plátano según la variedad analizada.

Municipio	Variedad	Subproductos					Rendimiento biomasa (%)	
		Racimo	Calcetas		Coraza		Pseudotallo (g)	(%)
		Almidón (g)	Fibras (g)	Savia (g)	Almidón (g)	Fibras (g)		
Casabianca	Dominico	2500	219,31 + 22,16	223,33 + 22,75	180,13 + 26,13	52,30 + 11,79	675,07	4,81
	Hartón	1740	163,42 + 33,82	222,13 + 100,0	175,49 + 57,96	64,85 + 16,70	625,89	3,71
	Dominico hartón	2570	191,41 + 1,18	295,67 + 94,25	198,89 + 48,82	74,18 + 3,15	760,15	4,33
	Africano	2320	159,88 + 5,80	246,8 + 31,45	301,00 + 93,13	109,79 + 25,62	817,47	4,85

Municipio	Variedad	Subproductos					Rendimiento biomasa (%)	
		Racimo	Calcetas		Coraza		Pseudotallo (g)	(%)
		Almidón (g)	Fibras (g)	Savia (g)	Almidón (g)	Fibras (g)		
Herveo	Dominico	2460	176,57 + 22,76	263,47 + 31,93	310,12 + 110,25	72,63 + 12,85	822,79	4,90
	Hartón	2010	130,25 + 60,20	299,87 + 103,35	269,34 + 50,01	117,27 + 32,15	816,73	4,37
	Dominico hartón	2390	215,91 + 64,63	285,67 + 76,94	277,74 + 41,14	88,12 + 41,14	867,44	4,87
	Africano	1780	113,89 + 42,05	280,8 + 69,40	199,49 + 34,84	87,11 + 12,39	681,29	3,95

Fuente: elaboración propia

Figura 5. Micrografías de los almidones provenientes de la variedad Hartón (Casabianca).

Tipo de almidón	Magnitud	
Racimo		
Coraza		

Fuente: elaboración propia

Tabla 5. Dimensiones de los almidones de plátano.

Municipio	Variedad	Tipo de almidón	Granulo		Fibra
			Diámetro longitudinal (µm)	Diámetro transversal (µm)	Diámetro (µm)
Casabianca	Dominico	Racimo	19,77 + 8,58	12,19 + 5,49	-
		Coraza	29,62 + 13,07	15,06 + 9,12	3,16 + 0,87
	Hartón	Racimo	25,05 + 8,69	14,84 + 5,60	-
		Coraza	39,41 + 1,37	21,23 + 9,64	4,02 + 0,30
	Dominico hartón	Racimo	24,96 + 9,45	13,37 + 4,84	-
		Coraza	34,35 + 1,01	19,52 + 8,56	2,96 + 1,16
	Africano	Racimo	19,28 + 6,57	11,89 + 3,94	-
		Coraza	28,84 + 10,01	16,29 + 7,55	3,13 + 0,69
Herveo	Dominico	Racimo	22,37 + 8,95	12,75 + 5,55	-
		Coraza	24,72 + 11,90	14,55 + 7,98	3,43 + 0,69
	Hartón	Racimo	14,94 + 6,29	9,06 + 3,56	-
		Coraza	28,10 + 13,96	15,19 + 7,94	4,03 + 0,75
	Dominico hartón	Racimo	21,14 + 8,18	12,43 + 4,60	-
		Coraza	25,31 + 10,95	14,31 + 6,77	2,64 + 0,70
	Africano	Racimo	26,30 + 9,20	15,25 + 5,24	-
		Coraza	31,94 + 15,97	21,27 + 9,85	3,05 + 0,92

Fuente: elaboración propia

En el caso de las fibras lignocelulósicas cortas del pseudotallo de plátano en estado nativo y modificado, se evidenciaron cambios en la superficie, reducción en la longitud y ancho de las fibras, la relación de aspecto y presencia de almidón (Tabla 6 y Figura 6). Las fibras cortas en estado nativo presentaron longitudes entre 330,26 a 468,35 µm y valores en el ancho entre 76,93 a 104,30 µm, pasando a una reducción en dichas dimensiones al someterlas a la explosión por vapor, siendo entre 138,17 a 350,38 µm y 43,05 a 96,51 µm, respectivamente. Neelamana et al., 2013, destaca que el método de explosión por vapor en fibras de banano reduce el diámetro de la fibra y que el tratamiento con vapor a alta presión ayuda a la separación y fibrilación de las fibras. Cabe recalcar que las fibras provenientes de Herveo al ser modificadas presentaron menores dimensiones

con respecto a lo evidenciado en las fibras modificadas provenientes de Casabianca. Otro análisis que se puede considerar es la relación de aspecto, siendo un parámetro relacionado con la capacidad en el nivel de reforzamiento de las fibras en el momento de emplearlos para la elaboración de un material compuesto, considerando la longitud y el diámetro de las fibras. A excepción de la variedad Dominico (Casabianca), las fibras, al experimentar una reducción en ambas dimensiones tras someterse a la explosión por vapor, presentan una disminución en su relación de aspecto. Este procedimiento podría afectar las propiedades mecánicas de un material compuesto que utilice fibras cortas tratadas por vapor. Fogue Matchum et al. (2024) afirman que algunas fibras del pseudotallo de plátano presentan defectos a lo largo de su longitud, lo que podría influir en las propiedades físicas y mecánicas a distintas escalas del pseudotallo.

Tabla 6. Dimensiones de las fibras lignocelulósicas modificadas por explosión por vapor.

Municipio	Variedad	Estado	Longitud (µm)	Diámetro (µm)	Relación de aspecto	Presencia de almidón nativo
Casabianca	Dominico	Nativo	347,48 + 33,32	104,30 + 73,29	3,33	Si
		Modificado	455,69 + 29,21	109,17 + 67,69	4,17	No
	Hartón	Nativo	395,66 + 39,51	78,21 + 8,35	5,05	Si
		Modificado	261,79 + 21,82	65,67 + 4,33	3,99	No
	Dominico hartón	Nativo	468,35 + 34,99	100,72 + 74,10	4,65	Si
		Modificado	326,25 + 27,93	84,48 + 72,23	3,86	No
	Africano	Nativo	330,26 + 22,61	76,93 + 62,50	4,29	Si
		Modificado	350,38 + 28,68	96,51 + 67,64	3.63	No

Municipio	Variedad	Estado	Longitud (µm)	Diámetro (µm)	Relación de aspecto	Presencia de almidón nativo
Herveo	Dominico	Nativo	625,25 + 35,28	121,97 +59,65	5,13	Si
		Modificado	138,17 + 15,93	43,05 + 30,58	3,21	No
	Hartón	Nativo	650,44 + 35,01	97,52 + 62,67	6,67	Si
		Modificado	226,19 + 16,64	57,11 + 36,38	3,96	No
	Dominico hartón	Nativo	616,80 + 34,33	138,05 + 68,05	4,47	Si
		Modificado	170,41 + 13,66	61,60 + 51,43	2,77	No
	Africano	Nativo	532,01 + 39,25	114,70 + 68,00	4,64	Si
		Modificado	138,17 + 15,93	43,05 + 30,58	3,21	No

Fuente: elaboración propia

Otro estudio donde se caracteriza las fibras nativas del pseudotallo del banano, indica que una fibra vegetal puede asimilarse a un apilamiento de pliegues reforzados con fibrillas de celulosa y que el análisis por medio del SEM confirma la presencia no solo de pliegues superficiales sino también de microdefectos laterales y transversales, donde las superficies de las fibras se muestran muy rugosas debido a la extracción de sustancias parietales (ceras, gomas, hemicelulosas y ligninas) (Sango et al., 2018). Del mismo modo, Badanayak et al., 2023, refiere que la topografía de la fibra nativa depende en gran medida del método de extracción y que esta superficie rugosa puede contener ciertas cantidades de desechos después de la extracción mecánica. Mientras que, al someter las fibras a un método de modificación superficial, como el desgomado químico produce fibras con una superficie lisa, teniendo en cuenta que el álcali elimina las pectinas, las hemicelulosas y una cierta cantidad de lignina de la fibra. En el caso de la explosión por vapor, siendo un procedimiento suave, se generó un mayor grado de porosidad en la superficie de las fibras, a través de la mayor presencia de cavidades en las fibras a través del retiro de algunas fracciones de hemicelulosa y lignina (Agbor et al., 2011; Castañeda-Niño et al., 2024). No obstante, en el SEM se evidenció la presencia de microfibrillas paralelas al eje de las fibras. Así mismo, Danso, 2021, menciona que

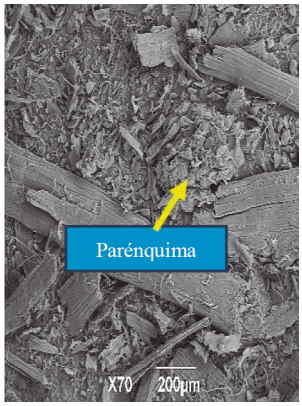
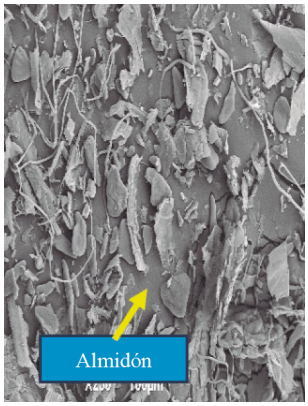
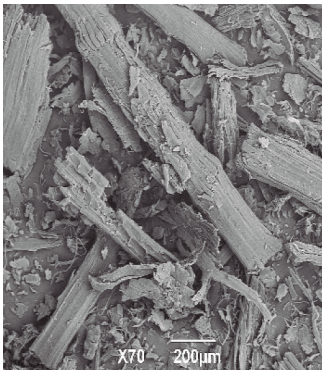
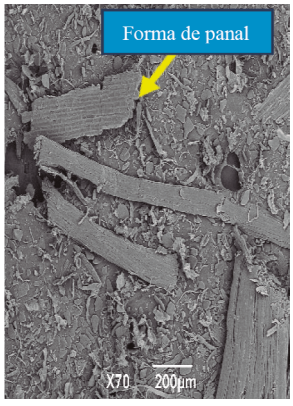
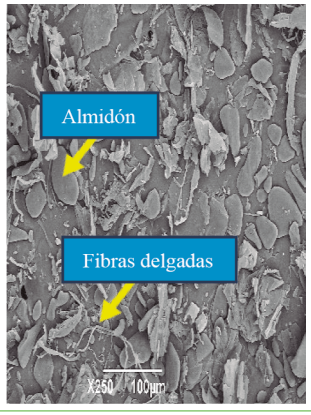
las fibras de pseudotallo de plátano muestran patrones continuos de microfibras con ligeras protuberancias en la superficie de la fibra. Los anteriores comportamientos se evidenciaron en las cuatro variedades y dos orígenes.

En cuanto al tamaño de partícula de los almidones identificados en las muestras (racimo y coraza), se logra identificar que el diámetro promedio en los almidones provenientes del racimo es menor con respecto a encontrado en la coraza, presentando valores entre 30,69 a 34,24 µm, mientras que de la coraza se encuentran valores entre 60,63 a 73,88 µm. En el caso de los diámetros máximos, los almidones extraídos del racimo lograron valores entre 54,69 a 61,92 µm, llegando a valores similares con respecto al promedio en los almidones aislados de la coraza. En el caso de los valores del diámetro máximo en los almidones de la coraza llegan hasta 165,10 µm, relacionando el enredamiento entre los gránulos de almidón, fibras lignocelulósicas y parénquima, contribuyendo en la generación de aglomerados.

Análisis proximal: los almidones provenientes del racimo de plátano presentaron un contenido de proteína entre el 4,20 al 5,40 %, obteniéndose mayor contenido en la variedad Hartón de Casabianca, mientras que el contenido de proteína proveniente de la coraza presentó valores entre 4,80 y 6,60 % donde el mayor valor fue obtenido en la variedad Dominico-Hartón de Herveo. Estos valores son superiores a los reportados por Valdez-Arana et al., 2020, donde se obtuvo proteína a partir del almidón de quinua con un valor de 0,58- 0,73 %; así mismo, De Dios-Avila et al., 2022, analizaron el contenido de proteína en un almidón de semilla de aguacate exhibiendo valores entre 0,40 y 0,45 %.

Respecto al contenido de lípidos, sus valores se encuentran entre 0,2 al 1,5 % en almidones de racimo y 1,1 al 1,3% en almidones de coraza; por otro lado, el contenido de ceniza en racimo presentó valores entre 1,5 al 2,6 % y en coraza de 11,6 hasta el 18,5%, mostrando mayor contenido de lípidos y ceniza en la variedad Africano en ambos orígenes. De la misma manera, el contenido de fibra en racimo cuenta con valores entre 0,5 a 2,8 % presentando predominancia en la variedad Dominico-Hartón (Herveo); en cuanto al contenido de fibra en almidón de coraza, se presentaron valores entre 5,1 al 8,8 % donde las variedades Africano y Hartón de Casabianca obtuvieron los mayores resultados (ver tabla 7). Según el reporte de Valdez-Arana et al., 2020, el contenido de grasa varió entre 0,60 a 0,95 %, el contenido de cenizas dio como resultado valores entre 1,37 a 2,32 % y el contenido de fibra fue del 1,55 %, donde la cantidad de esta última dependerá del tamiz utilizado para la eliminación del material fibroso durante el proceso de extracción. Así mismo, el contenido de cenizas en el almidón de aguacate fue entre el 0,05 al 0,06 % (De Dios-Avila et al., 2022). Según lo anteriormente reportado, el almidón de plátano presenta mayor cantidad de nutrientes respecto a otros almidones.

Figura 6. Comportamiento estructural en las fibras lignocelulósicas cortas (Casabianca).

Tipo de fibra	Variedad	Magnitud 70 x	Magnitud 250 X
Nativa	Dominico		
Modificada			
Nativa	Hartón		

Tipo de fibra	Variedad	Magnitud 70 x	Magnitud 250 X
Modificada			

Fuente: elaboración propia

Por último, los almidones de racimo de la variedad Africano (Casabianca) y de la variedad Hartón (Herveo), reportaron la mayor cantidad de amilosa con valores de 28,34 y 27,78 % respectivamente. Nasrin et al., 2015, afirmaron que el contenido de humedad para almidón de pulpa de plátano desechado del procesamiento de industrias, presentó un valor de 10 g/100 g (p/p), el contenido de amilosa fue de 39,8 g/100 g en almidón de pulpa de plátano desechado, 32,5 g/100 g en almidón de cáscara y 17,6 g/100 g en harina de cáscara. En base a lo anteriormente mencionado, es posible aseverar que la diferencia en los valores puede deberse a la variedad de plátano, estado de madurez y procesamientos. Con relación a la amilosa, los valores cercanos al 30 %, pueden alcanzar temperaturas de gelatinización a partir de 70 °C y son parte del grupo de los almidones resistentes a acciones enzimáticas (Castañeda-Niño et al., 2021). Otras investigaciones también confirman que almidones como el del plátano verde con alto contenido de amilosa y presencia de proteína, son ejemplos de almidón resistentes tipo II; además, después de hervir o cocinar a una temperatura inferior a su temperatura de gelatinización, este tipo de almidón conserva su estructura cristalina y sigue siendo resistente a la hidrólisis enzimática (Birt et al., 2013).

Contenido de amilosa: el contenido de amilosa en los almidones pertenecientes a los racimos plátanos de las variedades Dominico, Hartón, Dominico Hartón y Africano de los municipios de Casabianca y Herveo presentaron valores superiores al 20 %, siendo una característica de los almidones resistentes (Yee et al., 2021), sin embargo, el almidón Africano (Herveo) presentó un contenido por debajo del 20 %. Antes de continuar, se debe mencionar que el alto contenido en amilosa en almidones de plátano afecta las propiedades funcionales de gelatinización y retrogradación del almidón (de Barros Mesquita et al., 2016), así mismo favorece la formación de películas debido a su alta naturaleza anhidra y proporciona beneficios para la salud por su resistencia a la digestión (Kaur et al., 2020).

Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas de los almidones de plátano.

Municipio	Variedad	Fuente	Diámetro promedio (µm)	Diámetro máximo (µm)	Proteína (%)	Lípidos (%)	Cenizas (%)	Humedad (%)	Fibra cruda (%)	Amilosa (%)
Casabianca	Dominico	Racimo	33,18	61,02	5,20 + 0,08	0,3 + 0,003	1,5 + 0,01	5,10 + 0,06	0,80 + 0,02	22,67 + 0,13
		Coraza	71,91	165,10						3,22 + 0,34
	Hartón	Racimo	32,99	58,84	5,40 + 0,10	0,2 + 0,005	2,3 + 0,01	5,32 + 0,20	1,10 + 0,002	23,34 + 0,05
		Coraza	73,88	162,44	5,90 + 0,17	1,1 + 0,01	14,4 + 0,35	6,70 + 0,25	8,70 + 0,17	2,36 + 0,56
	Dominico hartón	Racimo	31,71	54,69	4,70 + 0.09	0,7 + 0,01	1,7 + 0,001	4,70 + 0,10	0,60 + 0,02	23,86 + 0,90
		Coraza	63,94	142,96						2,65 + 0,49
	Africano	Racimo	30,69	58,77	4,80 + 0,09	1,0 + 0,005	1,7 + 0,025	5,50 + 0,11	1,10 + 0,02	28,34 + 0,49
		Coraza	64,16	147,89	5,60 + 0,15	1,3 + 0,01	18,50 + 0,2	4,10 + 0,11	8,80 + 0,21	2,76 + 0,07
Herveo	Dominico	Racimo	33,12	59,36	5,1 + 0,05	1,10 + 0,02	1,60 + 0,03	5,41 + 0,09	0,6 + 0,001	23,67 + 0,28
		Coraza	62,06	133,59	4,80 + 0,06	1,20 + 0,01	16,0 + 0,47	5,60 + 0,03	5,50 + 0,06	2,27 + 0,19
	Hartón	Racimo	31,15	60,12	4,50 + 0,13	15,1 + 0,31	2,1 + 0,12	5,7 + 0,09	1,10 + 0,03	27,78 + 0,53
		Coraza	60,63	128,90						2,66 + 0,19
	Dominico hartón	Racimo	34,24	61,92	4,20 + 0,09	1,2 + 0,03	1,6 + 0,04	6,70 + 0,09	2,8 + 0,02	24,35 + 0,72
		Coraza	63,01	146,77	6,60 + 0,06	1,10 + 0,03	11,60 + 0,01	4,90 + 0,27	5,10 + 0,11	2,18 + 0,33
	Africano	Racimo	32,79	55,76	5,30 + 0,03	1,50 + 0,03	2,6 + 0,01	4,70 + 0,23	0,5 + 0,01	19,14 + 1,04
		Coraza	60,69	133,39						6,11 + 0,80

Fuente: elaboración propia

Tabla 8. Propiedades tecnofuncionales, térmicas y pH de los almidones de plátano.

Municipio	Variedad	Fuente	IAA	ISA	PH	Tm (°C)	ΔHm (J/g)	Td (°C)
Casabianca	Dominico	Racimo	2,79 + 8,85	2,19 + 0,98	2,82 + 8,79	127,64	116,61	
		Coraza	4,67 + 6,82	19,09 + 22,22	5,06 + 8,81	122,27	79,052	276,18
	Hartón	Racimo	2,64 + 4,82	2,09 + 3,73	2,66 + 4,78	126,53	107,21	
		Coraza	3,74 + 4,16	19,93 + 3,87	4,05 + 4,19	121,15	30,00	292,86
	Dominico hartón	Racimo	2,61 + 3,52	2,39 + 1,18	2,63 + 3,49	123,52	99,934	
		Coraza	4,52 + 3,60	27,95 + 0,61	5,06 + 3,63	131,2	3,516	281,54
	Africano	Racimo	2,88 + 4,42	2,44 + 6,38	2,91 +4,14	146,71	0,496	
		Coraza	4,38 + 2,26	10,14 + 13,87	4,57 + 2,79	123,93	59,387	280,48
Herveo	Dominico	Racimo	5,51 + 3,21	4,50 + 7,39	5,61 + 3,15	127,64	10,487	
		Coraza	5,02 + 2,96	23,41 + 1,18	5,54 + 2,81	126,85	8,61	275,43
	Hartón	Racimo	4,43 + 1,12	3,87 + 6,94	4,50 + 0,94	139,96	91,225	
		Coraza	3,96 + 8,57	23,91 + 1,86	4,39 + 8,55	123,11	60,95	274,46
	Dominico hartón	Racimo	4,93 + 11,47	5,24 + 2,16	5,03 + 11,53	153,97	18,402	
		Coraza	3,33 + 15,05	19,41 + 9,84	3,58 + 14,40	138,9	166,34	275,62
	Africano	Racimo	2,98 + 4,04	2,33 + 0,30	3,00 + 4,00	103,97	0,248	
		Coraza	3,93 + 3,78	26,76 + 1,67	4,38 + 3,55	111,43	8,582	286,78

Fuente: elaboración propia

Así mismo, se puede notar en la Tabla 7 que las variedades que presentaron mayor contenido de amilosa fue Africano (Casabianca) (28,34 ± 0,49 %), seguido por Dominico Hartón (23,86 ± 0,90 %), Hartón (23,34 ± 0,05 %), por último, Dominico (22,67 ± 0,13 %). Por otra parte, en el municipio de Herveo la variedad Hartón presentó un valor de (27,78 ± 0,53 %), seguido de Dominico Hartón (24,35 ± 0,72 %), Dominico (23,67 ± 0,28 %) y Africano con (19,14 ± 1,04 %), en este punto cabe destacar que los resultados son cercanos a los reportados por Agama-Acevedo et al., 2014; Kaur et al., 2020; Utrilla-Coello et al., 2014 y Yang et al., 2022, donde variedades como Macho, Enano, Morado, Valery, Nanicao y Grand Naine presentaron contenidos de amilosa entre 19,32 a 39,50 %. Tal como mencionan Miah et al., 2023, la variación en el contenido de amilosa en las variedades de plátano puede estar influenciada por diversos factores, como su genética, las diferencias en las fuentes de almidón, la temporada de cosecha, el entorno del cultivo y el grado de madurez en las muestras. Cuando se compara el almidón de plátano de las variedades cultivadas en los municipios de Casabianca y Herveo con otras fuentes comunes de almidón, como la papa, el arroz y la yuca, se observa una diferencia notable en el contenido de amilosa. Mientras que el almidón de plátano de los municipios de Casabianca y Herveo alcanzan valores entre 19,14 % a 28,34 %, las fuentes mencionadas reportan valores entre el 17 al 20 % (Solarte-Montúfar et al., 2019). Esta disparidad en el contenido de amilosa en el plátano puede mejorar la compatibilidad con otros materiales y las propiedades de estabilidad térmica en los materiales biodegradables.

Con respecto a los almidones obtenidos de las corazas del pseudotallo de plátano, se obtuvieron valor de amilosa que oscilan en intervalos entre 2,18 a 6,11 %, destacando particularmente la variedad Africano (Herveo), que exhibe el contenido de amilosa más alto registrado frente a las otras muestras de almidón de coraza, seguido por Dominico Casabianca con 3,22 %. Aunque estas dos variedades reportaron cantidades por encima del 3 %, son consideradas como almidones no resistentes, debido se encuentran por debajo del umbral del 20 % asociado a almidones resistentes (Yee et al., 2021). El anterior comportamiento de los almidones de coraza, considerando la presencia de una mezcla de gránulos de almidón y fibras dispersas en las muestras. Esta combinación estructural del almidón de coraza posee el potencial de incrementar las propiedades mecánicas en el desarrollo de materiales compuestos biobasados (Schutz, 2024), proporcionando mayor resistencia.

Índice de absorción de agua, solubilidad en agua y poder de hinchamiento (IAA, ISA y PH): el análisis realizado para los almidones provenientes del municipio de Casabianca, muestran los mayores valores tecnofuncionales en los almidones de coraza de las variedades Dominico y Dominico-Hartón. Mientras que los menores valores corresponden al almidón de racimo de la variedad Hartón (ver tabla 8). Los valores de IAA y PH proporcionan información sobre el grado de interacción entre las cadenas presentes en las regiones cristalinas y amorfas de los gránulos de almidón y son correlacionado

con el contenido de amilosa. Teniendo en cuenta lo mencionado, un mayor contenido de amilosa en el almidón contribuye a una menor funcionalidad, lo que podría limitar su aplicación en industrias de procesamiento de alimentos como panaderías. Además, la formación de complejos proteicos o lipídicos también influye en el poder de hinchamiento (Šárka et al., 2023). Enriquez-Valencia et al., 2023, reportan que a mayor contenido de amilosa en los gránulos de almidón aumenta la absorción de agua, mientras que el poder de hinchamiento y la solubilidad en agua está directamente relacionado con el contenido de amilopectina, porque la amilosa actúa como diluyente e inhibidor del hinchamiento; de esta manera, se evidencia que los almidones con bajo contenido de amilosa corresponden a los provenientes de las coraza de la variedad Dominico y Dominico Hartón (Casabianca); del mismo modo, en el municipio de Herveo se puede constatar que los almidones con mayor contenido de amilosa son los provenientes del racimo de la variedad Dominico y Dominico-Hartón. Los índices de solubilidad altos indican mejor dispersión del almidón en sistemas acuosos, lo que permite sugerirlos en aplicaciones para alimentos. El índice de absorción de agua más alto se presentó en el almidón de racimo de la variedad Dominico (Herveo), seguido de los almidones de coraza de las variedades Dominico y Dominico-Hartón de Casabianca, lo que puede deberse a una descomposición de las moléculas de almidón, que aumenta al aumentar contenidos de humedad y temperaturas (Nasrin et al., 2015).

Análisis Termogravimétrico (TGA): en los almidones de coraza, se destaca que las variedades Hartón (Casabianca) y Africano (Herveo) muestran la Td con mayor valor frente a los otros almidones de coraza (ver tabla 8). Además, los intervalos de temperatura de degradación varían entre 274,46 a 292,86 °C. Estos hallazgos son inferiores a los reportados por Del Aguila, 2022, encontrado que las variedades de plátano Moquicho y Guayabo, la temperatura de degradación se situó en 318,45 °C y 318,8 °C. Además, según X. Liu et al., 2008, en la temperatura de degradación ocurre el rompimiento de los enlaces C-C-H, C-O y C-C, conllevando a reacción de combustión y generando H_2O, CO y CO_2.

Calorimetría de barrido diferencial (DSC): se evaluaron las propiedades térmicas de los almidones de plátano mediante la técnica de DSC, considerando la temperatura de fusión (Tm) y la entalpía de fusión (ΔHm) tanto en los almidones de racimo como en los de coraza (Tabla 8). En el municipio de Casabianca, se observó que el almidón de racimo Africano presentó una Tm significativamente más alta, en contraste con los almidones de este mismo municipio, alcanzando temperaturas de fusión de 146,71 °C, mientras su ΔHm fue menor, registrando 0,496 J/g. Por otro lado, variedades como Dominico, Hartón y Dominico Hartón mostraron valores de Tm y ΔHm de 127,64 °C y 79,052 J/g, 126,53 °C y 107,21 J/g, y 123,52 °C y 99,934 J/g, respectivamente. Según lo señalado por Bello-Pérez et al., 2000; Park et al., 2007 y Wang et al., 2024, esta diferencia puede atribuirse al contenido de amilosa presente en cada tipo de almidón, debido a que los gránulos de almidón tienen una mayor resistencia al hinchamiento y requieren temperaturas

más altas para lixiviar las moléculas de amilosa y lograr el máximo hinchamiento. En la variedad Africano (ver tabla 7), se observa un contenido en amilosa del 28,34 ± 0,49 %, mientras que en Dominico, Hartón y Dominico Hartón este contenido oscila entre 22,67 al 23,86 %, siendo inferior al reportado por el almidón Africano. En cuanto a los valores reportados en el municipio de Herveo, la variedad Dominico Hartón mostró una Tm más alta, registrando 153,97 °C y una ΔHm menor de 18,402 J/g, mientras que las variedades Hartón, Dominico y Africano reportaron valores de Tm y ΔHm de 139,9 °C y 91,225 J/g, 127,64 °C y 10,487 J/g y 103,97 °C y 0,248 J/g, respectivamente. Estos resultados sugieren diferencias en la composición y estructura molecular de los almidones entre las variedades y los municipios estudiados. Además, una temperatura de fusión alta y una entalpía de fusión baja indican una mayor presencia de pequeños fragmentos de fibra y proteínas (Figura 1), mostrando una mayor estabilidad térmica y estructural en los almidones. Antes avanzar, se debe a aclarar que la ΔHm se refiere a la energía requerida para fusionar las fuerzas de enlace entre las dobles hélices en la región cristalina del almidón (de Barros Mesquita et al., 2016). Dicho lo anterior es conveniente decir que un mayor contenido de proteína requiere mayor energía para romper la doble hélice y debilitar la disposición interna del almidón (Chavez-Salazar et al., 2017; Cheng et al., 2024). Además, según Liu et al., 2015, entre más grandes son los gránulos de almidón, mayor es la temperatura de fusión (Tm). Por otro lado, un mayor contenido de amilosa en el granulo de almidón, significa mayor contenido de almidones resistentes, significado mayor temperatura de fusión y entalpias más altas (Bi et al., 2019; Li et al., 2018).

Con respecto a los almidones provenientes de la coraza de Casabianca, reportaron temperaturas de fusión en intervalos entre 121,15 a 131,2 °C y entalpias de fusión entre 3,52 a 30,00 J/g. Se destaca que la temperatura de fusión es mayor en el almidón de Dominico Hartón y menor en Hartón. Así mismo es importante señalar que las variedades Dominico y Africano mostraron valores de Tm de 122,27 °C y 123,93 °C, respectivamente, con entalpías de fusión de 79,052 J/g y 59,387 J/g. En relación con los almidones de coraza del municipio de Herveo, se observó que la variedad Dominico Hartón presentó una temperatura de fusión de 138,9 °C, con una entalpía de fusión notablemente alta de 166,34 J/g, seguido por Dominico con una Tm de 126,85 °C y una reducida ΔHm de 8,61 J/g, mientras que la variedad Africano mostró la temperatura de fusión más baja, registrando 111,43 °C, con una entalpía de fusión de 8,582 J/g. Estos resultados se atribuyen a la presencia de proteínas y a un mayor contenido de fibra lignocelulósicas en comparación con los almidones de racimo (ver tabla 7). Según Shao et al., 2023 y Yang et al., 2022, la presencia de proteínas en las muestras de almidón actúa como una barrera, retrasando el proceso de gelatinización y afectando la fluidez del agua en los gránulos de almidón, resultando en una menor interacción entre el almidón y el agua, reflejando en entalpías reducidas, como se observa en los almidones de la variedad Dominico Hartón (Casabianca), Dominico (Herveo) y Africano (Herveo).

En cuanto a los fragmentos de fibras lignocelulósicas encontrados en los almidones de coraza, estos fragmentos actúan como estructuras adicionales dentro de la matriz de almidón, modificando la dinámica de la gelatinización. Por un lado, pueden aumentar la resistencia del almidón a la gelatinización al actuar como obstáculos físicos que dificultan la ruptura de los gránulos de almidón y la liberación de sus componentes internos, como la amilosa y la amilopectina. En relación con las fibras lignocelulósicas, estas poseen una notable capacidad de absorción de agua, como señala Mudgil, 2017. Esta propiedad impacta en la estructura del almidón, interfiriendo en la capacidad de gelatinización de este. Además, el bajo contenido de amilosa en almidones provenientes de la coraza resulta en temperaturas de fusión y entalpías de fusión inferiores en comparación con los almidones racimo.

Siendo evidente que los almidones de racimo presentan un mayor contenido de amilosa en comparación con los de coraza (Tabla 7). Estas características sugieren que los almidones de racimo contienen una proporción alta en almidones resistente y estructuras más compactas, confiriendo una mayor capacidad de mantener la integridad durante el proceso de fusión. Investigaciones anteriores apoyan esta afirmación, indicando que un mayor contenido de amilosa y un mayor tamaño en los gránulos de almidón están asociados con una mayor estabilidad térmica durante la gelatinización del almidón (Bi et al., 2019; Li et al., 2018; Liu et al., 2015). En concordancia, los almidones provenientes de los racimos de plátano reportan Tm y ΔHm con mayores valores, reflejando una mayor resistencia a la desintegración.

Determinación del pH: las harinas derivadas de la pulpa y la cáscara de plátano de las cultivares Africano, Dominico, Hartón y Dominico Hartón, provenientes de los municipios de Casabianca y Herveo, presentaron valores de pH ligeramente ácidos, oscilando entre 5,63 a 6,10 (Tabla 9), mostrando un comportamiento similar a los descritos por Alkarkhi et al., 2011, Borges et al., 2009, Kumar et al., 2019b y Salazar et al., 2021, indicando valores de pH en intervalos entre 4,90 a 6,04 en variedades como Musa acuminado AAA, Gran Naine, Monthan, Saba, Nendran, Popoulu y Cavendish. Es importante destacar que en el municipio de Casabianca, las diferentes cultivares presentan pH que varían de 5,66 a 5,90, mientras en Herveo, las cultivares Africano y Dominico indican valores de 5,63 y 5,84 respectivamente, y para las cultivares Hartón y Dominico Hartón del mismo municipio, los valores son de 6,10 y 6,06, respectivamente. Estas diferencias pueden atribuirse a la composición nutricional del suelo, la cantidad de lluvia, la temperatura y la madurez del fruto.

Al realizar la extracción de almidón de cada una de las harinas de las distintas cultivares de plátano, se observó una disminución ligera en el pH. Esta reducción se atribuye a la presencia de metabisulfito de sodio ($Na_2S_2O_5$), debido a que este en presencia de agua se descompone en una solución acuosa, liberando dióxido de azufre (SO_2) (Ospina, 2020). El dióxido de azufre reacciona con el agua para formar ácido sulfuroso (H_2SO_3),

que a su vez puede ionizarse para producir iones de hidrógeno (H+), reduciendo el pH del medio. Es de mencionar que una extracción de almidón sin presencia de $Na_2S_2O_5$ puede presentar un pH entre 5,85 a 6,22 (Paramasivam et al., 2021), siendo estos datos cercanos a los obtenidos en las harinas de las diferentes variedades de plátano de los municipios ya mencionados. Es importante señalar que los almidones obtenidos de las variedades de Casabianca y Herveo mostraron intervalos de pH entre 5,21 a 5,60. Por último, Según Elvis, 2014, un almidón de buena calidad debe estar entre 4,47 a 5,50. Además, este autor reconoce que un almidón de alta calidad se caracteriza por su baja solubilidad y su capacidad de hinchamiento.

Tabla 9. Determinación de pH en harinas y almidones.

Municipio	Variedad	Subproducto	Triplicado			Promedio	D.E.
Casabianca	Africano	Harina	5,84	5,76	5,75	5,78	0,05
		Almidón	5,32	5,34	5,36	5,34	0,02
	Dominico	Harina	5,68	5,65	5,64	5,66	0,02
		Almidón	5,67	5,34	5,2	5,40	0,24
	Hartón	Harina	5,96	5,88	5,87	5,90	0,05
		Almidón	5,54	5,54	5,59	5,56	0,03
	Dominico hartón	Harina	5,8	5,72	5,73	5,75	0,04
		Almidón	5,4	5,33	5,29	5,34	0,06
Herveo	Africano	Harina	5,67	5,62	5,61	5,63	0,03
		Almidón	5,35	5,18	5,1	5,21	0,13
	Dominico	Harina	5,87	5,83	5,83	5,84	0,02
		Almidón	5,33	5,38	5,38	5,36	0,03
	Hartón	Harina	6,14	6,05	6,12	6,10	0,05
		Almidón	5,48	5,69	5,64	5,60	0,11
	Dominico hartón	Harina	6,06	6,06	6,05	6,06	0,01
		Almidón	5,67	5,51	5,45	5,54	0,11

Fuente: elaboración propia

Ensayo de tensión en las fibras lignocelulósicas: el análisis de las propiedades de tensión de las fibras nativas y modificadas provenientes de las calcetas se realizó siguiendo la norma ASTM D3822 (Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers 1, 2020). Esta norma proporciona directrices estandarizadas para evaluar

la resistencia y la elongación de las fibras, permitiendo comparar y analizar su comportamiento mecánico en diámetro de las fibras, resistencia máxima a la tensión (σmax), el módulo de elasticidad (E) y deformación en el punto de rotura (ε).

Los resultados obtenidos (Tabla 10) revelan que los diámetros de las fibras nativas se encuentran entre 179,13 a 215,22 µm, mientras que al comparar estos valores con los informados por Elbehiry et al., 2020, se observa que están dentro del intervalo mencionado y describen que en variedades como Grand Naine, Poovan, Nendran y Monthan, se presentaron diámetros de 225, 142, 119 y 170 µm. Igualmente, Brahma et al., 2024, reportaron en su investigación diámetros de fibras en la familia *(Musa balbisiana)* en intervalos de 80 a 250 µm, siendo similares a los obtenidos en las variedades provenientes del Tolima. Las fibras nativas que presentaron un mayor diámetro fueron Hartón y Africano del municipio de Herveo, mientras que en Casabianca fueron Dominico Hartón y Hartón. Se debe agregar que las fibras nativas de las variedades mencionadas anteriormente presentaron diámetros iguales o mayores a 200 µm. Estas variaciones en las distintas variedades se pueden deber a la parte de la planta donde fueron obtenidas las fibras, estado de madurez de la planta, ubicación geográfica, condiciones de crecimiento como temperatura, composición del suelo y humedad (Musa y Onwualu, 2024; Rowell et al., 2000).

Con el objetivo en la optimización de las propiedades de las fibras lignocelulósicas, las distintas variedades se sometieron a una modificación superficial, utilizando el método de explosión por vapor. Con este método se altera la composición de las fibras lignocelulósicas, reduciendo el contenido de hemicelulosa, al igual que se reduce un limitado contenido de lignina (Castañeda-Niño et al., 2024; Marques et al., 2020; Quintana et al., 2008). Como resultado, se obtuvieron diámetros en intervalos de 122,17 a 255,65 µm (ver tabla 10). Después de la modificación, la mayoría de las fibras de distintos municipios experimentaron una reducción en su diámetro, un comportamiento que refleja similitudes con lo reportado por Deepa et al., 2011 y Gupta et al., 2020. Esta reducción en el diámetro después de la modificación contribuye al aumento entre la relación L/D, conocida comúnmente como relación de aspecto, proporcionando una optimización superficial en la unión interfacial entre fibras y matrices poliméricas (Bruton et al., 2019; Deepa et al., 2011). Sin embargo, a pesar de que se observó una reducción en los diámetros de las variedades ya mencionadas, se presentó una excepción notable en la variedad Dominico Hartón (Casabianca). Por otra parte, y considerando el empleo de la molienda por cuchillas, no solamente redujo la longitud de las fibras, sino que también, redujo el espesor, afectando la eficiencia de la relación de aspecto según lo reportado por la SEM.

Tabla 10. Propiedades fisicoquímicas y de tensión en las fibras nativas y modificadas del pseudotallo de plátano.

Municipio	Variedad	Subproducto	Estado	Diámetro (µm)	σ (MPa)	E (GPa)	ε (%)
Casabianca	Dominico	Calceta	Nativo	179,13 + 47,38	413,74 + 301,40	8,75 + 5,39	5,31 + 2,02
			Modificado	163,04 + 32,25	387, 95 + 136,52	11,92 + 3,66	3,83 + 1,88
		Coraza	Nativo	-	-	-	-
	Hartón	Calceta	Nativo	200,87 + 67,14	316, 65 + 252,50	9,03 + 6,04	3,58 + 1,71
			Modificado	122,17 + 57,12	447,70 + 207,24	11,90 + 7,08	4,16 + 1,56
		Coraza	Nativo	-	-	-	-
	Dominico hartón	Calceta	Nativo	202,17 + 59,16	316,14 + 196,78	9,51 + 5,71	3,78 + 1,37
			Modificado	255,65 + 38,94	322,61 + 113,41	6,61 + 2,37	6,49 + 1,76
		Coraza	Nativo	-	-	-	-
	Africano	Calceta	Nativo	191,74 + 57,50	368,31 + 178,11	9,10 + 5,35	4,49 + 1,74
			Modificado	165,65 + 29,97	407,10 + 121,83	11,45 + 4,16	4,14 + 1,40
		Coraza	Nativo	-	-	-	-
Herveo	Dominico	Calceta	Nativo	193,04 + 31,54	339,50 + 121,37	10,13 + 2,59	3,25 + 0,69
			Modificado	186,96 + 53,89	199,59 + 98,40	4,80 + 2,51	4,42 + 1,25
		Coraza	Nativo	-	-	-	-
	Hartón	Calceta	Nativo	215,22 + 67,68	480,05 + 241,41	9,57 + 5,47	8,11 + 3,90
			Modificado	203,91 + 28,40	456,76 + 144,52	10,86 + 4,69	14,83 + 8,90
		Coraza	Nativo	-	-	-	-

Municipio	Variedad	Subproducto	Estado	Diámetro (µm)	σ (MPa)	E (GPa)	ε (%)
	Dominico hartón	Calceta	Nativo	181,74 + 28,07	376,13 + 127,00	13,10 + 3,62	3,07 + 0,61
			Modificado	166,09 + 16,35	444,83 + 176,01	11,92 + 4,07	5,16 + 5,64
		Coraza	Nativo	-	-	-	-
	Africano	Calceta	Nativo	200,87 + 30,14	394,40 + 192,13	11,46 + 3,53	4,44 + 1,79
			Modificado	140,87 + 27,62	407,10 + 121,83	8,28 + 3,71	4,17 + 1,36
		Coraza	Nativo	-	-	-	-

Fuente: elaboración propia

Las fibras nativas provenientes de los municipios de Herveo y Casabianca presentaron una σ_{max} entre 316,14 a 480,05 MPa, con un E entre 8,75 a 13,10 Gpa y una ε entre el 3,25 al 8,11 %. Comparando los resultados obtenidos con lo reportado por Elbehiry et al., 2020, la variedad de plátano Poovan presentó una σ_{max} de 267 MPa a partir de diámetros cercanos a 147,4 µm. Por otra parte, Venkateshwaran y Elayaperumal, 2010, mencionaron que en fibras de plátano que presentaron diámetros entre 80 a 250 µm, la σmáx oscilo entre de 54 a 754 MPa, ε de 10,35 y el E entre 7,7 a 20,0 GPa. De otro lado, Mohammed et al., 2023, reportaron una σ_{max} de 355 MPa, E de 33,8 GPa y la ε de 3,5 %. Considerando lo mencionado por los autores citados anteriormente, se puede afirmar que los resultados obtenidos (Tabla 10) muestran una notable similitud con los reportados por estos investigadores. En cuanto a los valores representativos obtenidos en los ensayos de tensión realizados en las distintas variedades de fibras de plátano, se han observado resultados en la variedad Dominico provenientes del municipio de Casabianca, así como en la variedad Hartón de Herveo. Siguiendo con el tema, al comparar los resultados obtenidos de las diferentes variedades de plátano con otras fibras vegetales como el coco, el bagazo y el algodón, se observa una variabilidad en las propiedades de tensión, debido a que cada una de las fibras vegetales presentan en su estructura contenidos diferentes de celulosa, ya que este componente genera naturalmente adecuadas propiedades mecánicas, gracias a que se compone de múltiples niveles de celulosa con un número de fibrillas (Hiremath et al., 2024). En el caso las fibras provenientes del coco los valores reportados de σmax varían entre 175 y 220 MPa, mientras el E es de 6 GPa y la ε entre el 15 al 25 %. En cambio, la fibra del bagazo

de caña reporta valores de σ_{max} que oscilan entre 20 a 290 MPa, E de 33,8 GPa, y ε de 5,3 %. Por último, la fibra de algodón presenta una σmax de 400 MPa, E de 12 GPa y una ε que varía entre el 3 al 10 % (Hiremath et al., 2024; Mohammed et al., 2023). En comparación, las fibras de plátano, específicamente las variedades Dominico (Casabianca) y Hartón (Herveo), presentan valores de resistencia y elasticidad que, si bien varían según la variedad y el origen, se ubican dentro del intervalo de las fibras vegetales previamente mencionadas. Por ejemplo, la primera variedad de fibra de plátano reporto una σmax de 413,74 MPa, E de 8,75 GPa y la ε de 5,31 %, de otro lado la segunda variedad presentó una σmax de 480,05 MPa, un E de 9,57 GPa, y una ε de 8,11 %, demostrando que estas fibras poseen una combinación de resistencia y flexibilidad adecuada, similares a las fibras vegetales ya descritas.

Al realizar la modificación superficial de las fibras a través del método de explosión por vapor, se observó una reducción en la σ_{max} en algunas variedades, como la variedad Dominico (Casabianca), Dominico (Herveo) y Hartón (Herveo). En contraste, las otras variedades mostraron un aumento en esta propiedad. Además, las fibras modificadas de la calceta de plátano presentaron una reducción en el módulo de elasticidad (E) en la variedad Dominico Hartón (Casabianca), mientras que este parámetro disminuyó en las variedades Dominico, Hartón y Africano de Herveo. En cuanto a la ε, las variedades Dominico (Casabianca) y Africano (Casabianca) mostraron una disminución de su valor, mientras que, en Herveo, este parámetro aumentó en todas las variedades. Estos cambios en las propiedades mecánicas pueden deberse a las alteraciones en la estructura interna de las fibras provocadas por el tratamiento de explosión por vapor (Castañeda-Niño et al., 2024). Según lo mencionado por Deepa et al., 2011, este método reduce la cantidad de hemicelulosa y lignina presentes a en las fibras y aumenta la α-celulosa, además las fibras sufren una disminución en su diámetro, permitiendo un aumento en las propiedades de tensión de las fibras modificadas.

Obtención de almidón termoplástico (TPS) a partir del plátano

Influencia de las variedades y origen: al determinar las propiedades de tensión en los TPS correspondientes a las cuatro variedades de los dos orígenes, se identificó mayores valores de resistencia máxima a la tensión ($\sigma_{máx}$) y del módulo de elasticidad en los tratamientos provenientes de Herveo (Tabla 11). El anterior comportamiento posiblemente se deba al mayor índice de solubilidad en agua de los almidones provenientes de Herveo, relacionando mayor capacidad de la desestructuración de los gránulos de almidón al someterse en un medio plastificado a alta temperatura y presencia de cizalla (proceso de extrusión), permitiendo gener (Olatunde et al., 2017) ar una mayor interacción entre

las cadenas poliméricas del almidón y la estructura de la glicerina a través de puentes de hidrógeno (Castañeda Niño, 2012). En término de las variedades, el comportamiento de la $\sigma_{máx}$ y el E entre las variedades Dominico hartón, Hartón y Africano fueron similares en los dos orígenes, presentando valores inferiores en la primera variedad, pasando por lo otorgado por el Hartón y los mayores valores fueron encontrados en la variedad Africano, mientras que en la variedad Dominico presento el mayor (Herveo) y el menor (Casabianca) valor entre los tratamientos de TPS en estudio, relacionando una posible implicación con las diferencias en las condiciones del microclima y/o aplicación de las labores culturales de cada municipio (Jayaprabha et al., 2011).

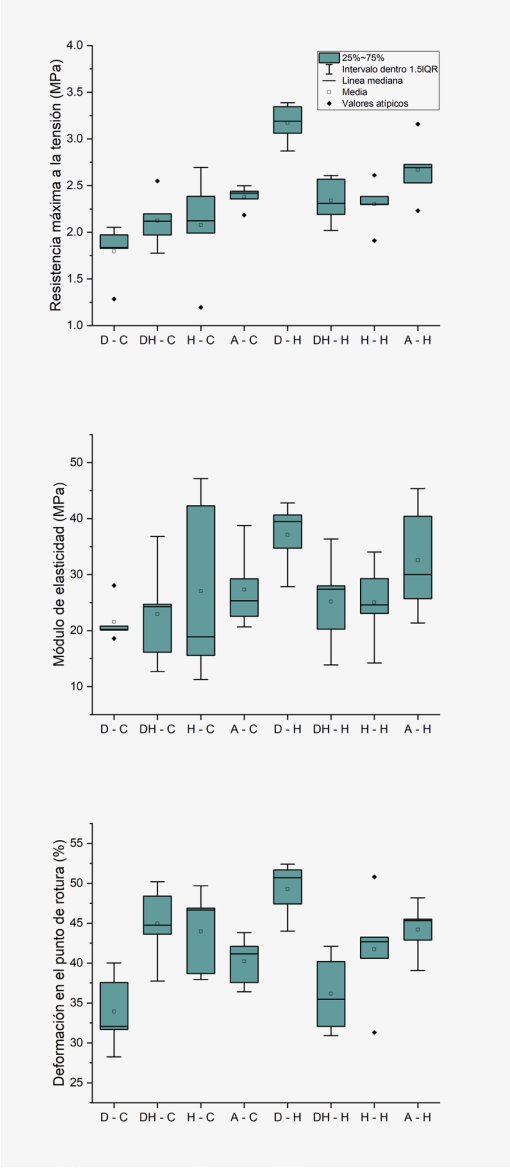
Con el propósito de identificar diferencias significativas entre las variedades de plátano y orígenes de cosecha para determinar la fuente de almidón que suministre mayores propiedades de $\sigma_{máx}$ y E en el TPS, se consideró la realización de un diseño experimental unifactorial y empleando la prueba paramétrica ANOVA y la prueba de comparación múltiple de Tukey, se identificaron diferencias significativas entre los Dominico de los orígenes de Casabianca y Herveo, siendo superior en las tres propiedades de tensión en el último origen (Figura 7). De igual forma, los resultados obtenidos en la $\sigma_{máx}$ y el E fueron superiores con respecto a lo reportado por Venegas et al., 2022, al procesar harina de plátano variedad Hartón mezclado con fibras de las calcetas del pseudotallo de plátano, obteniendo valores de 2,36 y 23,62 MPa, respectivamente.

Tabla 11. Propiedades de tensión en TPS según la variedad y origen.

Municipio	Variedad	σmáx (MPa)	E (MPa)	ε (%)
Casabianca	Dominico	$1,79 + 0,30^{a}$	$21,56 + 3,73^{a}$	$33,92 + 4,77^{a}$
	Dominico hartón	$2,09 + 0,56^{a,b}$	$27,04 + 16,46^{a,b}$	$43,98 + 5,31^{b,c}$
	Hartón	$2,12 + 0,29^{a,b}$	$22,93 + 9,34^{a,b}$	$44,95 + 4,85^{b,c}$
	Africano	$2,38 + 0,12^{a,b}$	$27,31 + 7,16^{a,b}$	$40,21 + 3,12^{a,b,c}$
Herveo	Dominico	$3,17 + 0,21^{c}$	$37,11 + 5,95^{b}$	$49,25 + 3,49^{c}$
	Dominico hartón	$2,30 + 0,25^{a,b}$	$25,03 + 7,42^{a,b}$	$36,15 + 4,91^{a,b}$
	Hartón	$2,34 + 0,25^{a,b}$	$25,18 + 8,50^{a,b}$	$41,72 + 6,99^{a,b,c}$
	Africano	$2,67 + 0,34^{b,c}$	$32,56 + 10,05^{a,b}$	$44,19 + 3,43^{b,c}$

Fuente: elaboración propia

Figura 7. Propiedades de tensión de almidones termoplásticos según la variedad y origen.



Fuente: elaboración propia

Influencia del almidón proveniente de la coraza del pseudotallo de plátano: considerando que otros subproductos del plátano pueden suministrar almidón, siendo el caso de la coraza, un tejido del pseudotallo que no se ha aprovechado en la transformación de nuevos productos e identificando la presencia de almidón (Aziz et al., 2011; Castañeda-Niño et al., 2024), se realizaron dos tratamientos de TPS con la

incorporación de dicho almidón en mezclas con el almidón de racimo proveniente del Dominico (Herveo) para la elaboración del TPS, participando en un 5 y 10 % y se evaluaron sus propiedades de tensión (Tabla 12) apenas fueron procesadas a través de la extrusión de tornillo doble. La incorporación del 5 % de almidón de la coraza en las mezclas para la obtención del TPS, contribuyo en el incremento de la $\sigma_{máx}$ y el E, mientras que al continuar con el aumento del contenido (10 %) de dicho almidón en la mezcla, se generó un valor de $\sigma_{máx}$ por debajo de lo otorgado por el TPS puro (Tabla 12), mientras que el valor del E se encontró por debajo del TPS con 5 % de almidón de coraza. Según lo identificado en el almidón de coraza a través de la SEM, en su composición se encuentran fibras lignocelulósicas con diámetros inferiores a 4 µm (Castañeda-Niño et al., 2024), que pueden contribuir en el incremento de las propiedades de tensión (Bodirlau et al., 2013; Chen et al., 2020; Versino et al., 2015). Por otro lado, el índice de solubilidad en agua del almidón de coraza es superior (23,41 g/g) a lo otorgado por el almidón de racimo (4,5 g/g), siendo un comportamiento similar a lo evidenciando por Aziz et al., 2011, en harinas de coraza de banano con un valor de 33,28 g/g, contribuyendo en una mayor dispersión y entrelazamiento de las cadenas poliméricas del almidón de la coraza con el almidón de racimo y el plastificante para conformar el TPS a partir de un incremento de la participación de la amilopectina, sin embargo, al incrementar la participación del almidón de coraza en un 10 %, se relaciona un ablandamiento de la estructura del TPS (menor $\sigma_{máx}$ y E), posiblemente al disponer de cadenas poliméricas de menor peso molecular a partir de las fracturas generadas en el almidón durante el procesamiento. En el caso de la ε, la presencia del almidón de coraza contribuyo a la restricción de las cadenas poliméricas de almidón, pasando de 49,25 % en el TPS puro a valores entre 20,44 a 22,47 %, relacionando la presencia de las fibras lignocelulósicas que actúan como refuerzo en el TPS (Bodirlau et al., 2013; Chen et al., 2020; Pérez-Pacheco et al., 2016; Versino et al., 2015). A partir del ANOVA y la prueba de comparación múltiple de Tukey, se identificó diferencias estadísticas significativas cuando se incrementa el contenido del almidón de la coraza al 10 % en el TPS, afectando los valores de la $\sigma_{máx}$ y el E. Por otro lado, la adición del almidón de coraza genera diferencias significativas en el E y reduce la ε. Por consiguiente, se establece el uso indispensable del 5 % de almidón de coraza en los posteriores tratamientos.

Tabla 12. Influencia del almidón de coraza en el TPS.

Municipio	Variedad	Contenido almidón de coraza (%)	$\sigma_{máx}$ (MPa)	E (MPa)	ε (%)
Herveo	Dominico	0	$3,17 + 0,21^{a,b}$	$37,11 + 5,95^{a}$	$49,25 + 3,49^{a}$
		5	$3,23 + 0,44^{b}$	$67,50 + 12,08^{b}$	$20,44 + 4,60^{b}$
		10	$2,54 + 0,51^{a}$	$53,16 + 7,54^{b}$	$22,47 + 3,50^{b}$

Nota: Los valores promedio con misma letra no difieren estadísticamente (Tukey 0,05)

Fuente: elaboración propia

Alternativas para el desarrollo de materiales compuestos biobasados

Influencia de fibras cortas nativas y modificadas provenientes de las calcetas del pseudotallo: el empleo de fibras lignocelulósicas cortas permite generar un refuerzo con orientación aleatoria a matrices a base de TPS, siendo una alternativa para continuar con el incremento de las propiedades de tensión. De igual forma, se evaluaron dos tipos de fibras cortas, nativas y modificadas a partir del tratamiento superficial de la explosión por vapor, contemplando su participación en las mezclas de TPS hasta en un 2 % de fibras provenientes de las calcetas y el 1 % de la coraza (ver tabla 13), ya que el empleo de mayor contenido de fibras para la obtención de un material compuesto biobasado con orientación aleatoria a través de la extrusión no fue posible por la alta viscosidad generada y el alto torque (mayor a 80 N.m) presentado durante el procesamiento. Según lo anterior, hay que considerar la concentración de fibras cortas provenientes del pseudotallo que pueden ser procesadas en una operación unitaria con procesamiento continuo para facilitar futuros escalamientos de procesamientos para nuevos materiales biobasados. En ese caso, Mo et al., 2011, reportaron el procesamiento del TPS de yuca mezclado con 20 % fibras lignocelulósicas del pseudotallo de plátano y plastificado con 40 % de glicerina.

Tabla 13. Influencia de las fibras cortas nativas y modificadas en el TPS.

Tipo de fibra corta	Contenido de fibra corta (%)	$\sigma_{máx}$ (MPa)	E (MPa)	ε (%)
Nativo	0,33ca	$3,35 + 0,21^{a,b,c}$	$60,10 + 13,52^{a,b,c}$	$21,57 + 5,02^{b}$
	0,67ca	$3,68 + 0,13^{b,c}$	$75,03 + 25,80^{a,b,c,d}$	$19,91 + 3,27^{b}$
	1,00ca	$3,99 + 0,47^{c}$	$70,86 + 10,12^{a,b,c,d}$	$20,49 + 4,17^{b}$
	2,00ca	$2,20 + 0,77^{a,b}$	$102,64 + 23,98^{c,d,e}$	$7,65 + 3,81^{a}$
	2,00ca + 1,00co	$3,42 + 0,17^{a,b,c}$	$87,85 + 23,91^{a,b,c,d,e}$	$11,13 + 2,87^{a}$
Modificada	0,33ca	$3,26 + 1,40^{a,b,c}$	$130,13 + 15,33^{e}$	$8,27 + 1,56^{a}$
	0,67ca	$2,50 + 0,30^{a,b}$	$56,53 + 11,71^{a,b}$	$24,07 + 2,81^{b}$
	1,00ca	$2,01 + 0,52^{a}$	$51,91 + 9,38^{a}$	$24,10 + 7,37^{b}$
	2,00ca	$2,89 + 0,64^{a,b,c}$	$99,24 + 38,18^{b,c,d,e}$	$7,53 + 2,83^{a}$
	2,00ca + 1,00co	$2,62 + 1,08^{a,b,c}$	$109,79 + 19,31^{d,e}$	$6,15 + 2,21^{a}$

Fuente de fibra: Calceta (ca); Coraza (co). Los valores promedio con misma letra no difieren estadísticamente (Tukey 0,05)

Fuente: elaboración propia

Al emplear las fibras lignocelulósicas nativas y cortas para el desarrollo del material compuesto, se generó un mayor desarrollo del E que de la $\sigma_{máx}$, ya que se logró un incremento entre el 4,97 al 92,59 % en el E mientras que el aumento de la $\sigma_{máx}$ se encontró entre el 0,93 al 23,53 %. Lo anterior indica que la incorporación de las fibras lignocelulósicas cortas puede contribuir en el aumento de la fuerza de unión en la matriz a través de puentes de hidrógeno y anclajes mecánicos a través de la interacción fibra-matriz. En el caso de la incorporación de las fibras lignocelulósicas cortas nativas, se contribuyó en un leve incremento de la $\sigma_{máx}$ a medida que aumentó su contenido hasta llegar al 1,0 %, mientras que el E logro un valor máximo de 102,64 MPa hasta llegar a un contenido del 2,0 % (Tabla 13). Mientras que la incorporación de las fibras modificadas por el método de explosión por vapor para conformar el material compuesto biobasado, solamente logro mantener valores similares de la $\sigma_{máx}$ otorgada por el TPS puro al introducir el 0,33 % de las fibras, sin embargo, se generó el mayor E (130,13 MPa) entre los 10 tratamientos basados en fibras nativas y modificadas. De acuerdo con el estudio de Mo et al., 2011, la $\sigma_{máx}$ y el E fueron superiores con respecto a lo obtenido, ya que al incorporar hidróxido de magnesio (15 %) en la mezcla a extruir, lograron valores de 24.8 MPa y 3,1 GPa. La explosión por vapor genera el retiro de porciones de lignina y hemicelulosa en la superficie de las fibras (Agbor et al., 2011) y considerando la aplicación del anterior procedimiento en fibras lignocelulósicas cortas, posiblemente se relacione una menor interacción entre la matriz y este tipo de fibras. El empleo de fibras por hibridación al incorporar el 1,0 % de fibras provenientes de la coraza y mezclarlas con el 2,0 % de las fibras de la calceta, no generaron un refuerzo con diferencias significativas en ninguno de los dos tipos de fibras, siendo un resultado opuesto a lo evidenciado en otras investigaciones enfocadas en el desarrollo de materiales compuestos biobasados empleando el fundamento del refuerzo por hibridación como en el caso de Lai et al., 2024, al emplear un TPS de maíz mezclado con un 1 % de nanocelulosa y 4 % de nanobentonita como refuerzo de hibridación, incluyendo el ácido cítrico como agente de entrecruzamiento mediante el empleo del método casting, logrando un incremento de la σmáx de 9,17 MPa. Según la anterior reducción de las propiedades de tensión considerando el fundamento de hibridación, posiblemente las propiedades de tensión de las fibras provenientes de la coraza son menores con respecto a las fibras de la calceta y se presente una baja relación de aspecto.

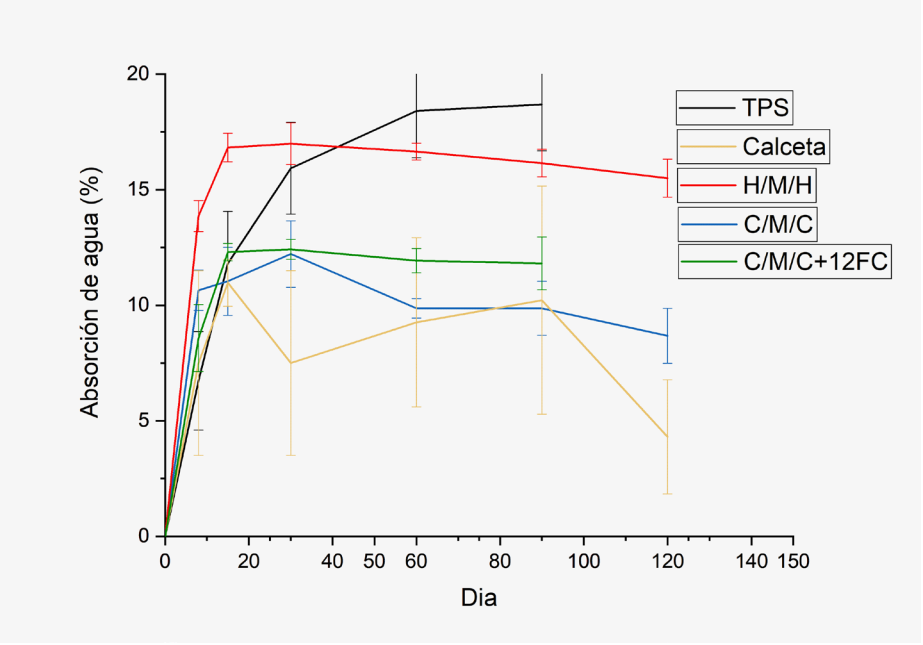
Influencia de las calcetas y hojas como refuerzo tipo sándwich: de acuerdo con lo desarrollado previamente, no se ha logrado suplir una de las deficiencias que puede presentar un TPS y un material compuesto biobasado con orientación aleatoria, ya que no se logra obtener propiedades de tensión similares a las otorgadas por los plásticos derivados del petróleo para la elaboración de empaques y envases (Fekete et al., 2019; Zhang et al., 2020). Otra desventaja es la absorción de agua que pueden presentar los anteriores materiales, ya que pueden presentar valores entre el 14 al 18 % (Figura 8). Una alternativa para contrarrestar las anteriores problemáticas se basa en realizar un

recubrimiento del TPS de plátano mediante el empleo de calcetas y hojas de plátano con adecuaciones físicas y mecánicas previamente realizadas para facilitar la adherencia superficial. De acuerdo a la figura 8, en los primeros 15 días de evaluación, la calceta proveniente del pseudotallo de plátano y los materiales compuestos biobasados constituidos por calcetas (C/M/C), hojas de plátano (H/M/H) y calcetas con refuerzo de fibras cortas de las calcetas (C/M/C+12FC) presentaron pendientes de mayor intensidad relacionando una mayor capacidad en la absorción de agua con respecto al TPS puro, debiéndose posiblemente a que las fibras y otros componentes presentes en las calcetas de plátano tengan mayor capacidad en la retención de agua a corto plazo. Sin embargo, a partir del día 30 se absorbió la mayor cantidad de agua posible e inició un proceso de liberación de agua o pérdida de peso, encontrando una absorción de agua del 16,99 % en H/M/H, 12,42 % en C/M/C+12FC y 12,22 % en C/M/C, mientras que el TPS sigue aumentando con la absorción de agua en un 15,92 %. En el día 90, el TPS continúa absorbiendo agua con un valor del 18,68 % mientras que los materiales compuestos biobasados continuaron con la reducción de peso, logrando un valor del 15,50 % en H/M/H y 8,68 % en C/M/C. Otro análisis para considerar entre los materiales compuestos biobasados es el tipo de material a emplear como refuerzo, encontrando que la hoja de plátano posee mayor capacidad en la absorción de agua con respecto a las calcetas y las fibras nativas de las calcetas.

Al considerar las propiedades de tensión de los materiales compuestos biobasados propuestos, se encuentra un incremento en la $\sigma_{máx}$ y el E con respecto a los procesamientos previamente mencionados mientras que su capacidad de deformación se redujo a valores por debajo del 8,81 % (Tabla 14). El tratamiento constituido por la hoja de plátano no contribuyó al incremento de la $\sigma_{máx}$ y el E, pero si otorgó un comportamiento frágil en la ε, mientras que el empleo de las calcetas de plátano en los materiales compuestos biobasados que presentaron la estructura tipo sándwich generaron una $\sigma_{máx}$ entre 19,63 a 24,84 MPa y un E entre 415,53 a 3029,29 MPa, indicando una mayor adherencia entre la matriz y las calcetas, la menor alteración o degradación de la calceta durante el procesamiento a alta temperatura mediante el empleo del moldeo por compresión y la mayor fuerza de unión de los enlaces presentes en el material compuesto C/M/C+12FC al poseer un 12 % de fibra nativa corta orientada aleatoriamente en la matriz que lo compone.

Otro análisis para considerar entre los materiales compuestos biobasados es el tipo de material a emplear como refuerzo, encontrando que la hoja de plátano posee mayor capacidad en la absorción de agua con respecto a las calcetas...

Figura 8. Absorción de agua del TPS, calceta y materiales compuesto biobasados a base de plátano



Fuente: elaboración propia

Tabla 14. Propiedades de tensión en los materiales compuestos biobasados a base de plátano.

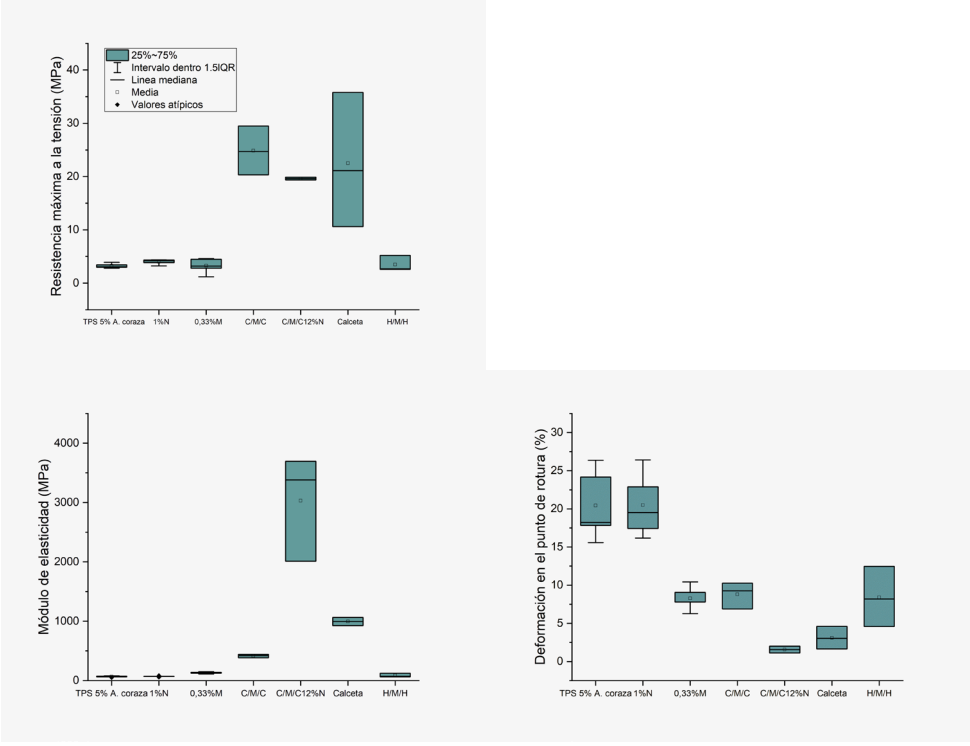
Recubrimiento de plátano		Refuerzo fibra corta		$\sigma_{máx}$ (MPa)	E (MPa)	ε (%)
Material	Estructura	Tipo de refuerzo	Contenido (%)			
Calceta	Sándwich (C/M/C)	N.A.	0	24,84 + 4,58^{b}	415,53 + 28,99^{a,b}	8,81 + 1,74^{a}
Calceta	Sandwich (C/M/C+12FC)	Nativa	12	19,63 + 0,38^{b}	3029,29 + 894,57^{c}	1,56 + 0,63^{a}
Calceta	Sin matriz	-	-	22,51 + 12,66^{b}	994,88 + 97,51^{b}	3,10 + 1,47^{a}
Hoja	Sándwich (H/M/H)	-	-	3,49 + 1,49^{a}	85,47 + 32,69^{a}	8,41 + 3,95^{a}

Los valores promedio con misma letra no difieren estadísticamente (Tukey 0,05)

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con la Tabla 14 y la Figura 9, se identificaron diferencias estadísticamente significativas en la $\sigma_{máx}$ al recubrir el TPS proveniente de la variedad Dominico (Herveo) con calcetas de plátano (C/M/C y C/M/C+12FC). De igual forma, solamente las fibras cortas dispersas de forma aleatoria en la matriz perteneciente al material compuesto C/M/C+-12FC generó una diferencia significativa en el E. Mientras que, en la ε, el empleo de hojas, calcetas y/o fibras cortas de plátano en la matriz del material compuesto biobasado permitieron la restricción del movimiento macromolecular del almidón, otorgando un comportamiento frágil a partir de la capacidad de deformarse.

Figura 9. Comparación de las propiedades de tensión entre los tratamientos relevantes del estudio.



Fuente: elaboración propia

Conclusiones

El aprovechamiento de las materias primas disponibles en el plátano se encuentra entre el 4 al 5 % con respecto al peso fresco de la planta madre y el racimo, disponiendo de siete subproductos: harinas y almidones del racimo de plátano, la savia, fibras nativas y modificadas de las calcetas del pseudotallo de plátano, almidón y fibras de la coraza del

pseudotallo de plátano. Dependiendo de la variedad y su origen, una fuente botánica se resaltó por aportar mayor contenido de uno de los anteriores subproductos, identificando a la variedad Dominico Hartón (Casabianca) la que otorgó mayor contenido de almidón de racimo, Dominico (Casabianca) aportó mayor contenido de fibras provenientes de las calcetas, Dominico (Herveo) generó la mayor proporción de almidón de la coraza y Hartón (Herveo) contribuyó principalmente con las fibras de la coraza. Según lo anterior, no hay una variedad que genere los mayores rendimientos de extracción de todos los subproductos. Los almidones provenientes del racimo de plátano de las cuatro variedades presentaron tres características de los almidones resistentes: presencia de proteína, alto contenido de amilosa y superficies lisas y compactas en los gránulos. En el caso de las fibras lignocelulósicas provenientes de la calceta del pseudotallo, otorgaron una $\sigma_{máx}$ por encima de 316 MPa, a partir de 8,75 GPa y una deformación por debajo de 5,31 %, siendo una alternativa para reemplazar y/o competir con las fibras de fique.

En el momento de elaborar los almidones termoplásticos de plátano, se obtuvieron las mayores propiedades de tensión al emplear la variedad Dominico (Herveo), ya que presentó el mayor valor en el índice de solubilidad en agua, permitiendo liberar las cadenas de amilosa y amilopectina para distribuirse el almidón gelatinizado en la mezcla para su elaboración. De igual forma, se pudo incorporar un 5 % de almidón de coraza sin afectar las propiedades de tensión, permitiendo un mayor aprovechamiento de los subproductos del plátano. El refuerzo de la fibra nativa corta otorgó mayores propiedades en el TPS Dominico (Herveo) hasta el empleo del 1 % de fibra nativa proveniente del pseudotallo y se logró su procesamiento sin afectar las dimensiones del cordón extruido y pellet hasta lograr una concentración del 2 % de fibras nativas de la calceta y 1 % de fibras nativas de la coraza. El empleo de las fibras cortas explotadas por vapor solo logró un incremento del E hasta participar en un 0,33% en el TPS. Las calcetas del pseudotallo de plátano lograron emplearse como refuerzo final en el material compuesto, logrando incrementos en la σmáx y el E por encima del 100 % y la reducción en la capacidad de la absorción de agua.

Referencias

Adeniyi, A. G., Ighalo, J. O., y 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

Agama-Acevedo, E., Rodriguez-Ambriz, S. L., García-Suárez, F. J., Gutierrez-Méraz, F., Pacheco-Vargas, G., y Bello-Pérez, L. A. (2014). Starch isolation and partial characterization of commercial cooking and dessert banana cultivars growing in Mexico. *Starch/Staerke, 66*(3–4), 337–344. https://doi.org/10.1002/star.201300125

Agarwal, S. (2021). Major factors affecting the characteristics of starch-based biopolymer films. *European Polymer Journal*. 160. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110788

Agbor, V. B., Cicek, N., Sparling, R., Berlin, A., y Levin, D. B. (2011). Biomass pretreatment: Fundamentals toward application. *Biotechnology Advances, 29*(6), 675-685. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.05.005

Akpabio, U. D., Udiong, D. S., y Akpakpan, A. E. (2012). The physicochemical characteristics of plantain (Musa Paradisiaca) and banana (Musa Sapientum) pseudostem wastes. *Advances in Natural and Applied Sciences, 6*(2), 167–172.

Alkarkhi, A. F. M., Ramli, S. B., Yong, Y. S., y Easa, A. M. (2011). Comparing physicochemical properties of banana pulp and peel flours prepared from green and ripe fruits. *Food Chemistry, 129*(2), 312–318. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.04.060

Aziz, N. A. A., Ho, L. H., Azahari, B., Bhat, R., Cheng, L. H., y Ibrahim, M. N. M. (2011). Chemical and functional properties of the native banana (Musa acuminata x balbisiana Colla cv. Awak) pseudo-stem and pseudo-stem tender core flours. *Food Chemistry, 128*(3), 748–753. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.100

Badanayak, P., Jose, S., y Bose, G. (2023). Banana pseudostem fiber: A critical review on fiber extraction, characterization, and surface modification. *Journal of Natural Fibers 20*(1). Taylor and Francis Ltd. https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2168821

Balakrishnan, S., Wickramasinghe, G. L. D., y Wijayapala, U. G. S. (2021). Investigation on mechanical and chemical properties of mechanically extracted banana fibre in pseudostem layers: From Sri Lankan banana (Musa) cultivation waste. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 16. https://doi.org/10.1177/15589250211059832

Basak, S., Saxena, S., Chattopadhyay, S. K., Narkar, R., y Mahangade, R. (2016). Banana pseudostem sap: A waste plant resource for making thermally stable cellulosic substrate. *Journal of Industrial Textiles, 46*(4), 1003-1023. https://doi.org/10.1177/1528083715591580

Bello-Pérez, L. A., Romero-Manilla, R., y Paredes-López, O. (2000). Preparation and Properties of Physically Modified Banana Starch Prepared by Alcoholic-Alkaline Treatment. *Starch/Staerke, 52*(5), 154–159. https://doi.org/10.1002/1521-379x(200006)52:5<154::aid-star154>3.0.co;2-%23

Bi, Y., Zhang, Y., Gu, Z., Cheng, L., Li, Z., Li, C., y Hong, Y. (2019). Effect of ripening on in vitro digestibility and structural characteristics of plantain (Musa ABB) starch. *Food Hydrocolloids*, 93, 235–241. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.02.043

Birt, D. F., Boylston, T., Hendrich, S., Jane, J. L., Hollis, J., Li, L., McClelland, J., Moore, S., Phillips, G. J., Rowling, M., Schalinske, K., Paul Scott, M., y Whitley, E. M. (2013). Resistant starch: Promise for improving human health. In Advances in Nutrition (Vol. 4, Issue 6, pp. 587–601). American Society for Nutrition. https://doi.org/10.3945/an.113.004325

Bodirlau, R., Teaca, C. A., y Spiridon, I. (2013). Influence of natural fillers on the properties of starch-based biocomposite films. Composites Part B: *Engineering, 44*(1), 575-583. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.02.039

Borges, A. de M., Pereira, J., y Lucena, E. M. P. (2009). Caracterização da farinha de banana verde Green banana flour characterization. *Ciênc. Tecnol. Aliment, 29*(2), 333–339. https://doi.org/10.1590/S0101-20612009000200015

Bruton, K., Hazael, R., Critchley, R., y Bloodworth-Race, S. (2019). Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review. *Express Polymer Letters 13*(2), 159-198. BME-PT and GTE. https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2019.15

Cadavid, Y., Cadena, E., Velez, J., y Santa, J. (2016). Degradation of dyes using plantain fibers modified with nanoparticules. *Renewable Materials for Stab Resistance Stab resistance Knitted fabric* (pp. 99–111). https://doi.org/10.1007/978-94-017-7515-1

Castañeda Niño, J. P. (2012). Estudio de la retrogradación en películas flexibles obtenidas a partir de mezclas de almidón nativo de yuca, ácido poli-láctico (PLA) y policaprolactona (PCL) [Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería]. Universidad del Valle.

Castañeda-Niño, J. P., Mina-Hernandez, J. H., y Solanilla-Duque, J. F. (2024). Potential of Plantain Pseudostems (Musa AAB Simmonds) for Developing Biobased Composite Materials. *Polymers, 16*(1357), 1–17. https://doi.org/10.3390/polym16101357

Castañeda-Niño, J. P., Mina-Hernandez, J. H., y Valdez-González, A. (2021). Potential uses of musaceae wastes: Case of application in the development of bio-based composites. In *Polymers 13*(11). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/polym13111844

Chavez-Salazar, A. M., Castellanos-Galeano, F. J., y Martinez-Hernandez, L. J. (2017). Effect of process variables in the production of fried green plantain in vacuum | Efecto de las variables de proceso en la obtención de plátano verde frito en condiciones de vacío. *Vitae, 24*(1), 38-46. https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v24n1a05

Chen, J., Wang, X., Long, Z., Wang, S., Zhang, J., y Wang, L. (2020). Preparation and performance of thermoplastic starch and microcrystalline cellulose for packaging composites: Extrusion and hot pressing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, 2295-2302. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.117

Cheng, Y. T., Huang, P. H., Chan, Y. J., Chiang, P. Y., Lu, W. C., Hsieh, C. W., Liang, Z. C., Yan, B. W., Wang, C. C. R., y Li, P. H. (2024). Investigate the composition and physicochemical properties attributes of banana starch and flour during ripening. Carbohydrate *Polymer Technologies and Applications*, 7. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100446

Chinnathambi, S., Kumar, P. S., Shuprajhaa, T., Shiva, K. N., y Narayanan, S. (2024). Elucidation of techno-functional, structural and rheological characteristics of pectin extracted from the peel of different banana (Musa. spp) varieties. *International Journal of Biological Macromolecules,* 258. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128989

Danso, H. (2021). Properties of Plantain Pseudo-Stem Fibres, Plantain Bunch Fibres, and Rice Husk for Construction Application. *Materials Circular Economy, 3*(1). https://doi.org/10.1007/s42824-021-00028-0

Daza Serna, L. V., Solarte Toro, J. C., Serna Loaiza, S., Chacón Perez, Y., y Cardona Alzate, C. A. (2016). Agricultural Waste Management Through Energy Producing Biorefineries: The Colombian Case. *Waste and Biomass Valorization, 7*(4), 789-798. https://doi.org/10.1007/s12649-016-9576-3

de Barros Mesquita, C., Leonel, M., Franco, C. M. L., Leonel, S., Garcia, E. L., y dos Santos, T. P. R. (2016). Characterization of banana starches obtained from cultivars grown in Brazil. *International Journal of Biological Macromolecules*, 89, 632-639. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.05.040

De Dios-Avila, N., Tirado-Gallegos, J. M., Rios-Velasco, C., Luna-Esquivel, G., Isiordia-Aquino, N., Zamudio-Flores, P. B., Estrada-Virgen, M. O., y Cambero-Campos, O. J. (2022). Physicochemical, Structural, Thermal and Rheological Properties of Flour and Starch Isolated from Avocado Seeds of Landrace and Hass Cultivars. *Molecules, 27*(3). https://doi.org/10.3390/molecules27030910

De La Torre-Gutierrez, L., Torruco-Uco, J. G., Castellanos-Ruelas, A., Chel-Guerrero, L. A., y Betancur-Ancona, D. (2007). Isolation and structure investigations of square banana (Musa balbisiana) starch. *Starch/Staerke, 59*(7), 326-333. https://doi.org/10.1002/star.200700607

De Morais Teixeira, E., Da Róz, A. L., De Carvalho, A. J. F., y Da Silva Curvelo, A. A. (2005). Preparation and characterisation of thermoplastic starches from cassava starch, cassava root and cassava bagasse. *Macromolecular Symposia*, 229, 266–275. https://doi.org/10.1002/masy.200551133

Deepa, B., Abraham, E., Cherian, B. M., Bismarck, A., Blaker, J. J., Pothan, L. A., Leao, A. L., de Souza, S. F., y Kottaisamy, M. (2011). Structure, morphology and thermal characteristics of banana nano fibers obtained by steam explosion. *Bioresource Technology, 102*(2), 1988–1997. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.030

Del Aguila, C. A. (2022). *Propiedades funcionales, morfológicas y térmicas de harina y almidón de plátano variedades Musa acuminata AA y Musa acumonata AAA*. Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Dufour, D., Gibert, O., Giraldo, A., Sanchez, T., Reynes, M., Pain, J. P., ... y Díaz, A. (2009). Differentiation between cooking bananas and dessert bananas. 2. Thermal and functional characterization of cultivated Colombian Musaceae (Musa sp.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 57*(17), 7870-7876. https://doi.org/10.1021/jf900235a

Elbehiry, A., Elnawawy, O., Kassem, M., Zaher, A., Uddin, N., y Mostafa, M. (2020). Performance of concrete beams reinforced using banana fiber bars. *Case Studies in Construction Materials*, 13. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00361

Enriquez-Valencia, A. L., Lucas-Aguirre, J. C., Caicedo-Arana, Á., Rodríguez-Henao, E., Aguilera-Arango, G., Cañar-Serna, D. Y., y Ocampo, J. A. (2023). Physicochemical and functional evaluation of flours and starches from germplasm of *Musa spp*. IN COLOMBIA. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences, 39*(1), 107-120. https://doi.org/10.29393/CHJAA39-9EFAJ70009

Fekete, E., Bella, É., Csiszár, E., y Móczó, J. (2019). Improving physical properties and retrogradation of thermoplastic starch by incorporating agar. International Journal of Biological *Macromolecules*, 136, 1026-1033. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.109

Ferreira-Leitao, V., Gottschalk, L. M. F., Ferrara, M. A., Nepomuceno, A. L., Molinari, H. B. C., y Bon, E. P. S. (2010). Biomass residues in Brazil: Availability and potential uses. *Waste and Biomass Valorization, 1*(1), 65–76. https://doi.org/10.1007/s12649-010-9008-8

Fogue Matchum, S., Sikame Tagne, N. R., Huisken Mejouyo, P. W., Tido Tiwa, S., Wenga, B., Njeugna, E., Drean, J. Y., Bistac-Brogly, S., y Harzallah, O. (2024). Investigation of chemical, physical and morpho-mechanical properties of banana-plantain stalk fibers for ropes and woven fabrics used in composite and limited-lifespan geotextile. *Heliyon, 10*(8). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29656

Gañán, P., Zuluaga, R., Restrepo, A., Labidi, J., y Mondragon, I. (2008). Plantain fibre bundles isolated from Colombian agro-industrial residues. *Bioresource Technology, 99*(3), 486–491. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.012

García-Solís, S. E., Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E., y Flores-Silva, P. C. (2018). Plantain flour: A potential nutraceutical ingredient to increase fiber and reduce starch digestibility of gluten-free cookies. *Starch/Staerke, 70*(1-2). https://doi.org/10.1002/star.201700107

Giraldo Toro, A., Gibert, O., Ricci, J., Dufour, D., Mestres, C., y Bohuon, P. (2015). Digestibility prediction of cooked plantain flour as a function of water content and temperature. Carbohydrate *Polymers*, 118, 257-265. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.11.016

Gómez, T. S., Navacerrada, M. A., Díaz, C., y Fernández-Morales, P. (2020). Fique fibres as a sustainable material for thermoacoustic conditioning. *Applied Acoustics*, 164. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107240

González, K., Iturriaga, L., González, A., Eceiza, A., y Gabilondo, N. (2020). Improving mechanical and barrier properties of thermoplastic starch and polysaccharide nanocrystals nanocomposites. *European Polymer Journal*, 123. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.109415

Gupta, U. S., Dhamarikar, M., Dharkar, A., Chaturvedi, S., Tiwari, S., y Namdeo, R. (2020). Surface modification of banana fiber: A review. Materials Today: *Proceedings*, 43, 904-915. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.217

Hiremath, V. S., Reddy, D. M., Reddy Mutra, R., Sanjeev, A., Dhilipkumar, T., y J, N. (2024). Thermal degradation and fire retardant behaviour of natural fibre reinforced polymeric composites- A comprehensive review. *Journal of Materials Research and Technology, 30*, 4053-4063. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.085

Hoyos-Leyva, J. D., Jaramillo-Jiménez, P. A., Giraldo-Toro, A., Dufour, D., Sánchez, T., y Lucas-Aguirre, J. C. (2012). Physical, morphological characterization and evaluation of pasting curves of Musa spp. | Caracterización física, morfológica y evaluación de las curvas de empastamiento de musáceas [Musa spp.). *Acta Agronomica, 61*(3), 214–229.

Islam, Md. S., y Islam, Md. M. (2021). Sustainable reinforcers for polymer composites. *Advances in Sustainable Polymer Composites* (pp. 59–88). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820338-5.00003-5

Janssen, L., y Moscicki, L. (2009). Thermoplastic starch A green material for various industries. Wiley-VCH Verlag.

Jayaprabha, J. S., Brahmakumar, M., y Manilal, V. B. (2011). Banana pseudostem characterization and its fiber property evaluation on physical and bioextraction. *Journal of Natural Fibers, 8*(3), 149-160. https://doi.org/10.1080/15440478.2011.601614

Kaur, L., Dhull, S. B., Kumar, P., y Singh, A. (2020). Banana starch: Properties, description, and modified variations - A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, 2096-2102. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.058

Kumar, P. S., Saravanan, A., Sheeba, N., y Uma, S. (2019a). Structural, functional characterization and physicochemical properties of green banana flour from dessert and plantain bananas (Musa spp.). *LWT*, 116. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108524

Lai, D. S., Osman, A. F., Adnan, S. A., Ibrahim, I., Ahmad Salimi, M. N., y @ Mustapha, M. J. (2024). Thermoplastic starch hybrid biocomposite films with improved strength and flexibility produced through crosslinking via carboxylic acid. *Journal of Thermoplastic Composite Materials, 37*(3), 1150–1186. https://doi.org/10.1177/08927057231193372

Li, M., Tian, X., Jin, R., y Li, D. (2018). Preparation and characterization of nanocomposite films containing starch and cellulose nanofibers. *Industrial Crops and Products,* 123, 654-660. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.043

Liu, C., Wang, S., Chang, X., y Wang, S. (2015). Structural and functional properties of starches from Chinese chestnuts. *Food Hydrocolloids,* 43, 568-576. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.07.014

Liu, X., Yu, L., Liu, H., Chen, L., y Li, L. (2008). In situ thermal decomposition of starch with constant moisture in a sealed system. *Polymer Degradation and Stability*, *93*(1), 260-262. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.09.004

MADR. (2021). Cadena de plátano - Dirección de cadenas agrícolas y forestales.

Mamun, A. A., Heim, H. P., Faruk, O., y Bledzki, A. K. (2015). The use of banana and abaca fibres as reinforcements in composites. *Biofiber Reinforcements in Composite Materials* (pp. 236-272). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1533/9781782421276.2.236

Marques, F. P., Silva, L. M. A., Lomonaco, D., Rosa, M. de F., y Leitão, R. C. (2020). Steam explosion pretreatment to obtain eco-friendly building blocks from oil palm mesocarp fiber. Industrial Crops and Products, 143. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111907

Melo-Sabogal, D. V., Torres-Grisales, Y., Serna-Jiménez, J. A., y Torres-Valenzuela, L. S. (2015). Aprovechamiento de pulpa y cáscara de plátano (Musa paradisiaca spp) para la obtención de maltodextrina. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial, 13*(2), 76-85. https://doi.org/10.18684/BSAA(13)76-85

Miah, A. S., Islam, S., Abedin, N., Islam, N., Islam, F., Tisa, K. J., Saha, A. K., y Aziz, S. (2023). Physicochemical and functional properties of banana starch and its alternative returns. *Current Research in Nutrition and Food Science, 11*(2), 866-879. https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.11.2.34

Mina Hernandez, J. H. (2021). Effect of the incorporation of polycaprolactone (Pcl) on the retrogradation of binary blends with cassava thermoplastic starch (tps). *Polymers, 13*(1), 1-19. https://doi.org/10.3390/polym13010038

Mo, X., Qi, X., Zhong, Y., Li, R., y Mo, C. (2011). Preparation and properties of tapioca starch-banana fiber composites modified with magnesium hydroxide. *Advanced Materials Research*, 194-196, 1707–1710. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.194-196.1707

Mohammed, M., Oleiwi, J. K., Mohammed, A. M., Jawad, A. J. afar M., Osman, A. F., Adam, T., Betar, B. O., Gopinath, S. C. B., Dahham, O. S., y Jaafar, M. (2023). Comprehensive insights on mechanical attributes of natural-synthetic fibres in polymer composites. *Journal of Materials Research and Technology* (25), pp. 4960-4988). Elsevier Editora Ltda. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.148

Mohanty, A. K., Misra, M., y Drzal, L. T. (2005). *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites.* 1ª ed. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780203508206

Mohapatra, D., Mishra, S., y Meda, V. (2009). Plantains and their postharvest uses: an overview. *Stewart Postharvest Review 5*(5), 1-11. https://doi.org/10.2212/spr.2009.5.4

Mudgil, D. (2017). The Interaction Between Insoluble and Soluble Fiber. *Dietary Fiber for the Prevention of Cardiovascular Disease: Fiber's Interaction between Gut Micoflora, Sugar Metabolism, Weight Control and Cardiovascular Health* (pp. 35–59). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805130-6.00003-3

Musa, A. A., y Onwualu, A. P. (2024). Potential of lignocellulosic fiber reinforced polymer composites for automobile parts production: Current knowledge, research needs, and future direction. *Heliyon 10*(3). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24683

Müssig, J. (2010). Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications. *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*. https://doi.org/10.1002/9780470660324

Nasrin, T. A. A., Noomhorm, A., y Anal, A. K. (2015). Physico-Chemical Characterization of Culled Plantain Pulp Starch, Peel Starch, and Flour. *International Journal of Food Properties, 18*(1), 165–177. https://doi.org/10.1080/10942912.2013.828747

Neelamana, I. K., Thomas, S., y Parameswaranpillai, J. (2013). Characteristics of banana fibers and banana fiber reinforced phenol formaldehyde composites-macroscale to nanoscale. *Journal of Applied Polymer Science, 130*(2), 1239-1246. https://doi.org/10.1002/app.39220

NTC 668. (1973). *Norma Técnica NTC Colombiana 668 Alimentos y materias primas. Determinación de los contenidos de grasa y fibra cruda: Food and raw material. Determination of fat and crude fiber content.* Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC.

Olatunde, G. O., Arogundade, L. K., y Orija, O. I. (2017). Chemical, functional and pasting properties of banana and plantain starches modified by pre-gelatinization, oxidation and acetylation. *Cogent Food and Agriculture, 3*(1). https://doi.org/10.1080/23311932.2017.1283079

Ovalle-Serrano, S. A., Gómez, F. N., Blanco-Tirado, C., y Combariza, M. Y. (2018). Isolation and characterization of cellulose nanofibrils from Colombian Fique decortication by-products. *Carbohydrate Polymers*, 189, 169–177. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.02.031

Padhi, S., y Dwivedi, M. (2022). Physico-chemical, structural, functional and powder flow properties of unripe green banana flour after the application of Refractance window drying. *Future Foods, 5*. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100101

Paramasivam, S. K., Saravanan, A., Narayanan, S., Shiva, K. N., Ravi, I., Mayilvaganan, M., Pushpa, R., y Uma, S. (2021). Exploring differences in the physicochemical, functional, structural, and pasting properties of banana starches from dessert, cooking, and plantain cultivars (Musa spp.). *International Journal of Biological Macromolecules,* 191, 1056–1067. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.172

Park, I. M., Ibáñez, A. M., Zhong, F., y Shoemaker, C. F. (2007). Gelatinization and pasting properties of waxy and non-waxy rice starches. *Starch/Staerke, 59*(8), 388-396. https://doi.org/10.1002/star.200600570

Pérez-Pacheco, E., Canto-Pinto, J. C., Moo-Huchin, V. M., Estrada-Mota, I. A., Estrada-León, R. J., y Chel-Guerrero, L. (2016). Thermoplastic Starch (TPS)-Cellulosic Fibers Composites: Mechanical Properties and Water Vapor Barrier: A Review. *Composites from Renewable and Sustainable Materials*. InTech. https://doi.org/10.5772/65397

Quintana, G., Arroyave, M., y Suárez, D. E. (2008). Obtención de pulpa a partir de los residuos de palma africana pretratados con Steam Explosion.

Ramirez-Cortes, R., Bello-Pérez, L. A., Gonzalez-Soto, R. A., Gutierrez-Meraz, F., y Alvarez-Ramirez, J. (2016). Isolation of plantain starch on a large laboratory scale. *Starch/Staerke, 68*(5–6), 488-495. https://doi.org/10.1002/star.201500272

Robinson, J., y Galán, V. (2010). *Bananas and Plantains*. 2ª Ed.

Rodriguez, Lady. (2014). Elaboración de un material biocompuesto a partir de la fibra de plátano Elaboración de un material biocompuesto a partir de la fibra de plátano [Universidad Nacional de Colombia]. http://bdigital.unal.edu.co/47022/1/8911502.2014.pdf

Rowell, R. M., Han, J., y Rowell, J. S. (2000). Characterization and Factors Effecting Fiber Properties. *Natural Polymers and Agrofibers Composites*. pp. 115-134. Embrapa Instrumentação Agropecuária. Botucatu: UNESP https://www.researchgate.net/publication/237255433

Salazar, D., Arancibia, M., Lalaleo, D., Rodríguez-Maecker, R., López-Caballero, M. E., y Montero, M. P. (2021). Physico-chemical properties and filmogenic aptitude for edible packaging of Ecuadorian discard green banana flours (Musa acuminanta AAA). *Food Hydrocolloids,* 122. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107048

Sango, T., Cheumani Yona, A. M., Duchatel, L., Marin, A., Kor Ndikontar, M., Joly, N., y Lefebvre, J.-M. (2018). Step-wise multi-scale deconstruction of banana pseudo-stem (Musa acuminata) biomass and morpho-mechanical characterization of extracted long fibres for sustainable applications. *Industrial Crops and Products*, 122, 657-668. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.050

Šárka, E., Sinica, A., Smrčková, P., y Sluková, M. (2023). Non-Traditional Starches, Their Properties, and Applications. *Foods, 12*(20). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/foods12203794

Shao, Y., Jiao, R., Wu, Y., Xu, F., Li, Y., Jiang, Q., Zhang, L., y Mao, L. (2023). Physicochemical and functional properties of the protein-starch interaction in Chinese yam. *Food Science and Nutrition, 11*(3), 1499-1506. https://doi.org/10.1002/fsn3.3189

Schutz, G. F., de Ávila Gonçalves, S., Alves, R. M. V., y Vieira, R. P. (2024). A review of starch-based biocomposites reinforced with plant fibers. *International Journal of Biological Macromolecules,* 261, p. 129916. Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129916

Solarte-Montúfar, J. G., Díaz-Murangal, A. E., Osorio-Mora, O., y Mejía-España, D. F. (2019). Rheological and functional properties of the starch from three varieties of Creole potato. *Informacion Tecnologica, 30*(6), 35-44. https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000600035

Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers 1, Pub. L. No. D3822, ASTM 1 (2020). https://doi.org/10.1520/D3822_D3822M-14R20

Subagyo, A., y Chafidz, A. (2018). Banana Pseudo-Stem Fiber: Preparation, Characteristics, and Applications. In Banana Nutrition - Function and Processing Kinetics [Working Title] (pp. 1-19).

Sun, J., Guo, L., Bao, Y., y Xie, J. (2011). A simple, label-free AuNPs-based colorimetric ultrasensitive detection of nerve agents and highly toxic organophosphate pesticide. *Biosensors and Bioelectronics, 28*(1), 152-157. https://doi.org/10.1016/j.bios.2011.07.012 8

Thomsen, S. T., Kádár, Z., y Schmidt, J. E. (2014). Compositional analysis and projected biofuel potentials from common West African agricultural residues. *Biomass and Bioenergy,* 63, 210-217. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.045

Torres-Vargas, O. L., Gaytan-Martinez, M., Fernanda, C. C., Millán-Malo, B. M., y Rodriguez-Garcia, M. E. (2023). Changes in the physicochemical properties of isolated starch and plantain (Musa AAB Simmonds) flours for early maturity stage. *Heliyon, 9*(8). e18939. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18939

Utrilla-Coello, R. G., Bello-Perez, L. A., Lara, V. H., Vernon-Carter, E. J., y Alvarez-Ramirez, J. (2014). A fractal analysis approach for predicting starch retrogradation from X-ray diffractograms. *Starch/Staerke, 66*(1-2), 166-174. https://doi.org/10.1002/star.201300040

Valdez-Arana, J. del C., Steffolani, M. E., Repo-Carrasco-Valencia, R., Pérez, G. T., y Condezo-Hoyos, L. (2020). Physicochemical and functional properties of isolated starch and their correlation with flour from the Andean Peruvian quinoa varieties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 147, 997–1007. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.067

Venegas, R., Torres, A., Rueda, A. M., Morales, M. A., Arias, M. J., y Porras, A. (2022). Development and Characterization of Plantain (Musa paradisiaca) Flour-Based Biopolymer Films Reinforced with Plantain Fibers. *Polymers, 14*(4). https://doi.org/10.3390/polym14040748

Venkateshwaran, N., y Elayaperumal, A. (2010). Banana fiber reinforced polymer composites - A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites, 29*(15). pp. 2387-2396). https://doi.org/10.1177/0731684409360578

Versino, F., López, O. V., y García, M. A. (2015). Sustainable use of cassava (Manihot esculenta) roots as raw material for biocomposites development. *Industrial Crops and Products*, 65, 79-89. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.11.054

Wang, J., Li, Y., Ma, W., Zhang, J., Yang, H., Wu, P., Li, J., y Jin, Z. (2024). Physicochemical changes and in vitro digestibility of three banana starches at different maturity stages. *Food Chemistry: X*, 21. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101004

Xie, J., Zhang, Y., Klomklao, S., y Simpson, B. K. (2023). Pectin from plantain peels: Green recovery for transformation into reinforced packaging films. *Waste Management*, 161, 225-233. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.02.035

Yang, M., Chang, L., Jiang, F., Zhao, N., Zheng, P., Simbo, J., Yu, X., y Du, S. kui. (2022). Structural, physicochemical and rheological properties of starches isolated from banana varieties (Musa spp.). *Food Chemistry: X*, 16. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100473

Yee, J., Roman, L., Pico, J., Aguirre-Cruz, A., Bello-Perez, L. A., Bertoft, E., y Martinez, M. M. (2021). The molecular structure of starch from different Musa genotypes: Higher branching density of amylose chains seems to promote enzyme-resistant structures. *Food Hydrocolloids,* 112. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106351

Zhang, K., Cheng, F., Lin, Y., Zhou, M., Zhu, P., y Wu, D. (2020). Synergistic effects of sodium adipate/triethylene glycol on the plasticization and retrogradation of corn starch. Carbohydrate Research, 496. https://doi.org/10.1016/j.carres.2020.108112

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE BIODEGRADACIÓN DE RESIDUOS DE PLÁTANO: PERSPECTIVAS Y DESAFÍOS

Resumen

El capítulo se enfoca en la evaluación exhaustiva de la biodegradabilidad de los residuos del cultivo de plátano (*Musa paradisiaca* L.) en el contexto específico de los municipios de Herveo y Casabianca del departamento del Tolima. Se examina la composición química de los residuos de plátano y su potencial para descomponerse mediante procesos biológicos naturales. Se abordan técnicas y metodologías para medir la biodegradación, incluyendo análisis de carbono orgánico, cambios en la estructura molecular y actividad microbiológica. Además, se exploran factores ambientales y microbiológicos que influyen en la tasa y eficiencia de la biodegradación. Este análisis proporciona una base sólida para comprender la viabilidad ambiental de utilizar los residuos de plátano como materia prima en diversos procesos industriales, destacando su potencial para la economía circular y la reducción de residuos.

Palabras clave: biodegradación, residuos de plátano, composición química, eficiencia biológica

Abstract

The chapter focuses on the exhaustive evaluation of the biodegradability of plantain (*Musa paradisiaca* L.) crop residues in the specific context of the municipalities of Herveo and Casabianca in the department of Tolima. The chemical composition of plantain residues and their potential to decompose through natural biological processes were examined. Techniques and methodologies to measure biodegradation were addressed, including organic carbon analysis, changes in molecular structure and microbiological activity. In addition, environmental and microbiological factors that influence the rate and efficiency of biodegradation were explored. This analysis provides a solid basis for understanding the environmental feasibility of using plantain waste as feedstock in various industrial processes, highlighting its potential for circular economy and waste reduction.

Keywords: Biodegradation, Plantain Waste, Tolima, Chemical Composition, Biological Efficiency

Introducción

El plátano (*Musa paradisiaca* L.) es uno de los cultivos más importantes en Colombia, no solo por su contribución significativa a la economía nacional, sino también por su papel en la seguridad alimentaria y la generación de empleo en diversas regiones del país. Colombia es uno de los principales productores y exportadores de plátano y banano a nivel mundial, con plantaciones concentradas principalmente en las regiones de Urabá, Magdalena y La Guajira. Sin embargo, el cultivo también genera una cantidad considerable de residuos agrícolas, los cuales representan un desafío y una oportunidad para la gestión sostenible de recursos. El 95 % de los residuos del banano provienen de las partes no empleadas de la planta, debido a que usualmente se utiliza el fruto con fines comerciales y de consumo, desaprovechando otras partes de la planta por parte de los cultivadores (Solano-Apuntes et al., 2022). De la cosecha del racimo de banano, solo se aprovecha del 20 al 30 % de su biomasa, quedando un 70 a 80 % por utilizar. Esta fracción incluye el tallo de la planta, la yema, el raquis y la cáscara, que constituye del 35 al 40 % de la masa del plátano, desechos que se pueden emplear para producir diversos productos de valor añadido como la fécula (Rojas et al., 2019).

Entre el 10 % y el 80 % de las pérdidas se generan una vez realizada la poscosecha de banano. Estas pérdidas son causadas por accidentes mecánicos, enfermedades, maduración prematura, imperfecciones y mala manipulación, entre otros factores. La agroindustria es un sector importante debido a que la fruta que no cumple con los requisitos de calidad establecidos por los importadores; es decir, el rechazo de banano se

utiliza para agregar valor mediante la producción de diversos productos. Además, el banano rechazado también se emplea como fuente comestible para animales o para el mercado local (Vásquez et al., 2019).

La gestión efectiva de los residuos agrícolas representa un desafío crucial en la actualidad, especialmente en regiones con una importante actividad agrícola como los municipios de Herveo y Casabianca en el departamento del Tolima. En este contexto, los residuos del cultivo de plátano emergen como una preocupación significativa debido a su volumen considerable y su potencial impacto ambiental.

Los residuos de plátano, compuestos por una variedad de materiales orgánicos e inorgánicos, plantean interrogantes sobre su disposición final y su posible aprovechamiento como recursos renovables (Haro Velasteguí et al., 2017). Para abordar estas cuestiones, es fundamental comprender la capacidad de estos residuos para someterse a procesos de biodegradación, es decir, la descomposición por acción de microorganismos presentes en el medio ambiente (Chen et al., 2020a).

En este contexto, el presente capítulo se enfoca en realizar una evaluación de la biodegradabilidad de los residuos de plátano en los municipios de Herveo y Casabianca (Verma et al., 2024). Este análisis no solo tiene implicaciones ambientales, sino que también abre nuevas oportunidades para la economía local y la innovación tecnológica. La composición química única de los residuos de plátano, caracterizada por la presencia de celulosa, hemicelulosa, lignina, proteínas, lípidos y otros componentes, ofrece un substrato diverso para la actividad microbiana (Venegas et al., 2022). Sin embargo, la eficacia de la biodegradación depende de una serie de factores ambientales y microbiológicos, incluyendo la temperatura, la humedad, el pH del suelo, la diversidad microbiana y la disponibilidad de nutrientes.

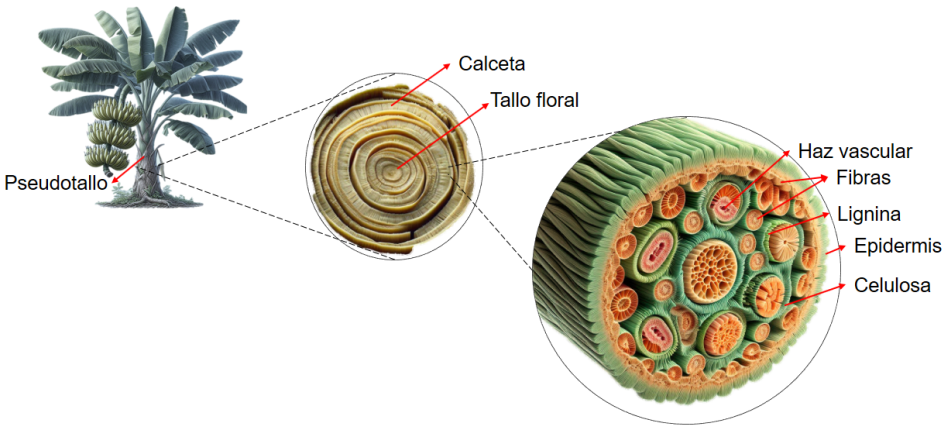
En este sentido, el análisis de la biodegradación de los residuos de plátano permitirá no solo comprender mejor la dinámica de descomposición en el entorno local, sino también identificar posibles aplicaciones industriales y estrategias de gestión de residuos más sostenibles (Saputri et al., 2024). Desde la producción de biocombustibles y fertilizantes orgánicos hasta el desarrollo de materiales biodegradables, la valorización de los residuos de plátano podría tener un impacto significativo en la economía circular y la mitigación del cambio climático en la región (Ferreira et al., 2024). Por lo tanto, el objetivo principal de este capítulo es proporcionar una descripción desde nivel celular y tejidos de plátano hasta materiales que pueden ser obtenidos a partir de los residuos de plátano. Se presenta una reseña sobre las técnicas utilizadas para la evaluación de la biodegradación, así mismo algunos resultados de biodegradación de materiales o biomoléculas obtenidas los residuos de plátano en los municipios de Herveo y Casabianca. A través de la revisión de la literatura científica, la descripción de metodologías

de análisis y la discusión de resultados, se busca avanzar en el conocimiento sobre este tema y sentar las bases para futuras investigaciones y acciones de desarrollo sostenible en la región.

Composición celular de plátano

Las células de las fibras de plátano presentan una estructura compleja y especializada que les confiere propiedades mecánicas y químicas distintivas. Estas células son componentes críticos en la constitución de los tejidos vegetales del plátano, especialmente en el raquis, el tallo y las cáscaras, donde se encuentran concentradas en haces vasculares y tejidos de sostén (Figura 1). En este sentido la epidermis es la capa más externa de las estructuras fibrosas del plátano. Esta capa celular está formada por células epidérmicas compactamente organizadas, que actúan como una barrera protectora contra agentes patógenos, pérdida de agua y daño mecánico. Las células epidérmicas suelen estar recubiertas por una cutícula cerosa que minimiza la transpiración.

Figura 1. Estructura celular de la fibra de plátano



Fuente: elaboración propia

Dentro del tejido fibroso, los haces vasculares son estructuras críticas que contienen xilema y floema. El xilema es responsable del transporte de agua y nutrientes desde las raíces hasta las diferentes partes de la planta, y está compuesto por células lignificadas, como los vasos y las traqueidas. El floema, por otro lado, transporta los productos de la fotosíntesis desde las hojas hacia otras partes de la planta y está formado por elementos de tubo criboso y células acompañantes. En las proximidades de los haces vasculares, las células del parénquima sirven como tejido de almacenamiento y transporte. Estas células tienen paredes delgadas y grandes vacuolas que almacenan agua, nutrien-

tes y otros compuestos orgánicos, y pueden diferenciarse para ayudar en la reparación de tejidos. Como resultado, las células de las fibras de plátano están altamente especializadas y organizadas en una estructura que optimiza tanto la resistencia mecánica como la eficiencia del transporte de nutrientes. La combinación de una epidermis protectora, haces vasculares robustos, lignificación, y una matriz de celulosa y otros polisacáridos, permite que estas células desempeñen roles cruciales en el crecimiento y la resistencia de la planta, estas estructuras celulares que conforman tejidos como pseudotallo, hojas, frutos, flores, son parte de esos residuos que se describieron anteriormente como productos subutilizados.

Composición química de los residuos de plátano

Los residuos del cultivo de plátano son una fuente rica y compleja de materia orgánica e inorgánica, cuya composición química varía según diversos factores, como el cultivar de plátano, el estado de madurez de la fruta, las prácticas agrícolas y los procesos de postcosecha (Oliveira et al., 2007) (Tabla 1).

Tabla 1. Principales componentes químicos presentes en los residuos de plátano.

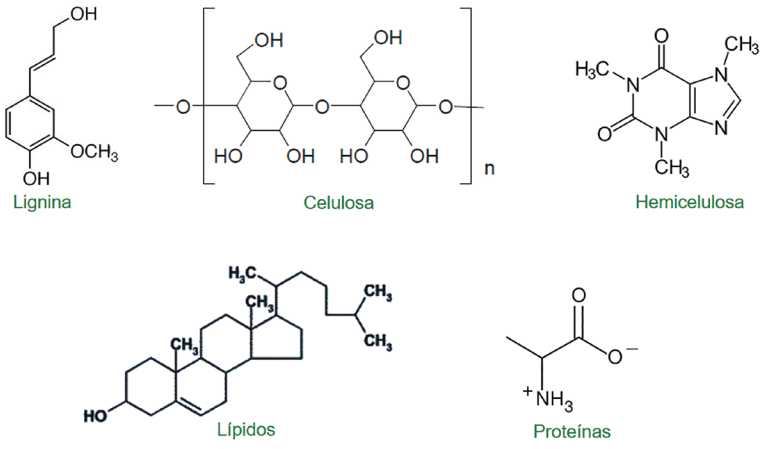
Molécula	Propiedades	Biodegradabilidad	Uso en Materiales Biodegradables	Referencia
Celulosa	Polisacárido compuesto por unidades de glucosa	Biodegradable por acción de enzimas celulolíticas	Utilizada como componente estructural en bioplásticos, papel y textiles	(Budiyantoro y Yudhanto, 2024)
Lignina	Polímero amorfo y resistente que une la celulosa en la pared celular	Relativamente resistente a la biodegradación	Se emplea como aditivo en la producción de bioplásticos y materiales compuestos	(Ralph et al., 2019)
Hemicelulosa	Polisacárido heterogéneo compuesto por varios monosacáridos	Biodegradable por acción de enzimas hemicelulolíticas	Utilizada en la fabricación de films biodegradables y materiales de embalaje	(Peng y Wu, 2010)
Proteínas	Macromoléculas compuestas por cadenas de aminoácidos	Biodegradables por acción de enzimas proteolíticas	Se emplean en la producción de bioplásticos y en la fabricación de películas comestibles	(Quesada y Gómez, 2019)

Molécula	Propiedades	Biodegradabilidad	Uso en Materiales Biodegradables	Referencia
Lípidos	Diversos compuestos orgánicos que incluyen grasas y aceites	Biodegradables por acción de microorganismos lipolíticos	Utilizados en la fabricación de biocombustibles y como agentes plastificantes en bioplásticos	(Hoyos y Rosales, 2014)

A continuación, se describen los principales componentes químicos presentes en los residuos de plátano y su relevancia en la biodegradabilidad de estos materiales:

Celulosa: la celulosa es el principal componente estructural de la pared celular de los tejidos vegetales y constituye una parte significativa de los residuos de plátano. Es un polisacárido lineal compuesto por unidades de glucosa unidas por enlaces beta-1,4 glucosídicos, lo que le confiere una estructura altamente fibrosa y resistente. La presencia de celulosa en los residuos de plátano proporciona un sustrato degradable para microorganismos celulolíticos, que pueden descomponer este polímero mediante la acción de enzimas específicas, como la celulasa (Singh et al., 2017).

Figura 2. Estructura molecular de los principales compuestos de plátano.



Fuente: elaboración propia

Lignina: la lignina es un polímero complejo y amorfo que se encuentra principalmente en las paredes celulares de tejidos leñosos de las plantas. Aunque los residuos de plátano contienen cantidades relativamente bajas de lignina en comparación con otros materiales lignocelulósicos, su presencia puede influir en la resistencia y la recalcitrancia de estos residuos a la degradación microbiana. La lignina actúa como un agente de

unión y protección en la matriz de la pared celular, dificultando el acceso de enzimas y microorganismos a los sustratos degradables, como la celulosa y la hemicelulosa (Covinich y Area, 2024).

Hemicelulosa: la hemicelulosa es un grupo de polisacáridos heterogéneos que se encuentran asociados con la celulosa en la matriz de la pared celular de las plantas. A diferencia de la celulosa, la hemicelulosa presenta una estructura más ramificada y contiene una variedad de monosacáridos, como glucosa, xilosa, arabinosa y manosa. La presencia de hemicelulosa en los residuos de plátano proporciona una fuente adicional de carbono y energía para los microorganismos descomponedores, contribuyendo así a la biodegradación de estos materiales (Budiyantoro y Yudhanto, 2024).

Proteínas: las proteínas son macromoléculas compuestas por cadenas lineales de aminoácidos que desempeñan diversas funciones biológicas en las plantas, incluida la estructural y la metabólica. Los residuos de plátano contienen una cantidad variable de proteínas, que pueden provenir de diversas estructuras celulares, como las membranas celulares y los orgánulos subcelulares. Las proteínas son susceptibles a la degradación microbiana, y su descomposición puede liberar aminoácidos y péptidos que pueden servir como sustratos adicionales para el crecimiento microbiano y la actividad enzimática (Rodrigues et al., 2023).

Lípidos: los lípidos son una clase diversa de compuestos orgánicos que incluyen grasas, aceites, ceras y esteroides, entre otros. En los residuos de plátano, los lípidos pueden estar presentes en forma de membranas celulares, cuerpos lipídicos y otros orgánulos subcelulares. Si bien los lípidos son menos abundantes que otros componentes en los residuos de plátano, pueden ser degradados por microorganismos lipolíticos para obtener energía y nutrientes (Fitriani et al., 2024).

Otros componentes orgánicos e inorgánicos: además de los componentes mencionados anteriormente, los residuos de plátano pueden contener una variedad de otros compuestos orgánicos e inorgánicos, como azúcares simples, ácidos orgánicos, minerales y pigmentos. Estos componentes pueden influir en la disponibilidad de nutrientes y en la actividad microbiana en el suelo, así como en la dinámica de la biodegradación de los residuos de plátano en el medio ambiente (López y Gómez Montaño, 2014).

Metodologías para la evaluación de biodegradación

La evaluación rigurosa de la biodegradación de los residuos de plátano implica la aplicación de un conjunto diverso de técnicas y metodologías que permiten abordar aspectos específicos de este proceso complejo. A continuación, se presentan algunas de las metodologías clave utilizadas para evaluar la biodegradación de estos residuos:

Análisis de carbono orgánico (CO): esta técnica se basa en la determinación cuantitativa del contenido de carbono orgánico presente en los residuos de plátano y sus productos de descomposición (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2013). La descomposición de la materia orgánica conduce a la liberación de dióxido de carbono (CO_2), que puede ser medido utilizando métodos colorimétricos, titulométricos o espectrofotométricos (Strotmann et al., 2004). La cuantificación de CO_2 liberado proporciona una estimación indirecta de la tasa y la eficiencia de la biodegradación de los residuos de plátano en el suelo a lo largo del tiempo (Strotmann et al., 2004).

Técnicas de espectroscopia: La espectroscopia infrarroja (IR) y la espectroscopia de resonancia magnética nuclear (RMN) son técnicas analíticas poderosas para investigar cambios en la estructura química y molecular de los residuos de plátano durante su biodegradación (Smidt et al., 2002). La espectroscopia IR permite la identificación de grupos funcionales específicos presentes en los residuos y la monitorización de su desaparición o modificación a medida que avanza la biodegradación. Por otro lado, la espectroscopia de RMN proporciona información detallada sobre la composición química y la estructura tridimensional de los compuestos orgánicos presentes en los residuos, lo que permite un seguimiento preciso de los cambios en la composición molecular durante el proceso de biodegradación (González et al., 2022).

Ensayos de actividad microbiológica: estos ensayos son fundamentales para evaluar la capacidad de los microorganismos presentes en el suelo para degradar los residuos de plátano (Fotosintéticas et al., 2011). Los ensayos pueden incluir medidas de actividad enzimática, como la actividad celulolítica, lignolítica y proteolítica, así como ensayos de respiración microbiana y biomasa microbiana (Reddy et al., 2003). La actividad enzimática se evalúa midiendo la velocidad de reacción de enzimas específicas responsables de la degradación de diferentes componentes de los residuos de plátano, proporcionando así una medida directa de la actividad microbiana involucrada en la biodegradación (Heredia Martín y Sánchez Castelblanco, 2020). Por otro lado, los ensayos de respiración y biomasa microbiana ofrecen una medida indirecta de la actividad metabólica y la biomasa de los microorganismos presentes en el suelo, lo que puede ayudar a estimar la actividad global de la comunidad microbiana implicada en la biodegradación de los residuos de plátano.

Enfoques moleculares: además de las técnicas mencionadas, los enfoques moleculares, como la secuenciación de genes y el análisis de expresión génica, pueden proporcionar información valiosa sobre la diversidad y la actividad de las comunidades microbianas involucradas en la biodegradación de los residuos de plátano (Doolette et al., 2016). Estos enfoques permiten identificar los microorganismos específicos presentes en el suelo y

analizar los genes y las vías metabólicas asociadas con la degradación de los residuos de plátano, lo que proporciona una comprensión más completa de los mecanismos subyacentes a este proceso.

La evaluación de la biodegradación de los residuos de plátano requiere la integración de múltiples técnicas y enfoques analíticos para abordar aspectos específicos de este proceso complejo. La selección de las metodologías adecuadas dependerá de los objetivos del estudio, las condiciones del sitio y la disponibilidad de recursos técnicos y financieros. La combinación de diferentes técnicas proporciona una evaluación más completa y precisa de la biodegradación de los residuos de plátano, lo que contribuye a mejorar nuestra comprensión de este importante proceso en la gestión de residuos agrícolas.

Entre las normas usualmente usadas para comprobación de biodegradación está la norma ASTM 5988-18 la cual proporciona un marco metodológico para evaluar el comportamiento de materiales poliméricos en ambientes compostados o de suelo, lo que resulta crucial para comprender ambientalmente estos materiales. Esta norma establece procedimientos específicos para determinar la descomposición microbiana y la degradación física de los polímeros bajo condiciones simuladas de compostaje o suelo, lo que permite una evaluación objetiva de su potencial de biodegradación, sin embargo, dependiendo de la utilidad o uso de biomaterial, *composite* o biomolécula se reporta el uso de diversas normas para la determinación de biodegradación como se describen a continuación (Tabla 2).

Tabla 2. Algunas normas utilizadas para la evaluación de materiales biodegradables.

Norma	Método	Tipo de Método
ASTM-D5338-15	Determinación de la biodegradación aeróbica de materiales plásticos en condiciones controladas de compostaje, incorporando temperaturas termófilas	Aeróbica
ASTM D5988-18	Determinación de la biodegradabilidad de plásticos en condiciones de compostaje doméstico	Aerobio
ASTM D7475:11	Método de prueba para la determinación de la degradación aerobia y anaerobia de materiales plásticos en condiciones de relleno mediante pruebas aceleradas en biorreactor.	Aerobio
ISO 14855-1:2012	Determinación de la biodegradabilidad de materiales plásticos en suelo bajo condiciones controladas	Aerobio

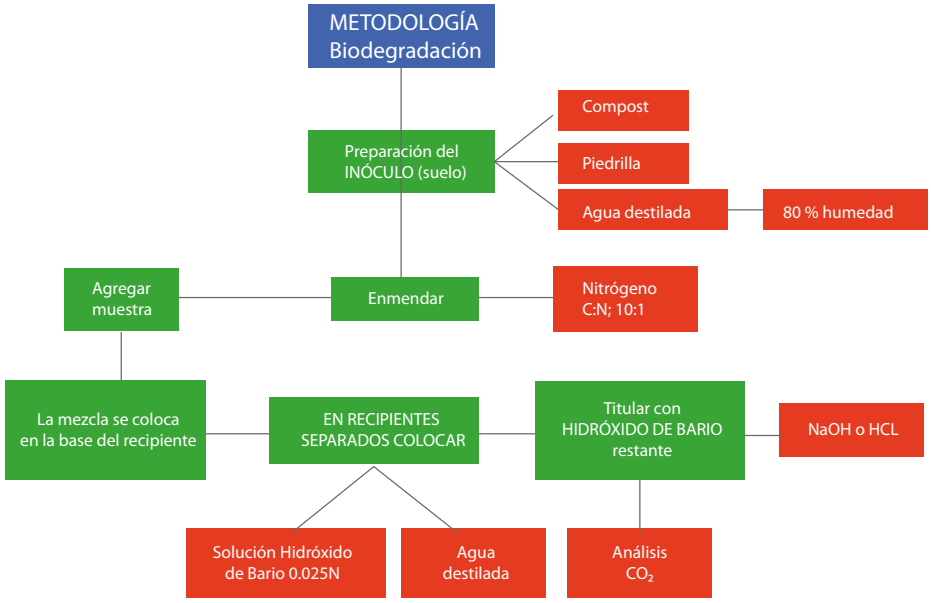
Norma	Método	Tipo de Método
ISO 13975:2012	Determinación de la biodegradabilidad anaerobia total de materiales plásticos en sistemas controlados de digestión de lodos - método por medición de producción de biogás.	Anaerobio
ISO 17556	Determinación de la biodegradabilidad de plásticos bajo condiciones anaerobias en condiciones específicas de digestión anaerobia	Anaerobio
NTC 6697:2023	Método de ensayo para determinar la biodegradación aeróbica de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje controladas, utilizando temperaturas termofílicas	Aerobio
GTC 370:2022	Exposición y ensayo de plásticos que se degradan en el medio ambiente mediante una combinación de oxidación y biodegradación	Aerobio
NTC-ISO 17088:2022	Plásticos. Reciclaje orgánico. Especificaciones para plásticos compostables	Aerobio

Fuente: elaboración propia

En la aplicación de la norma ASTM 5988-18, se inicia con la preparación adecuada de las muestras de polímero, que deben representar fielmente el material en su forma y composición originales. Estas muestras se someten entonces a un proceso controlado de compostaje o se entierran en suelo natural, según el escenario ambiental que se pretenda simular. Durante el periodo de prueba definido por la norma, se monitorean diversos parámetros, incluyendo la pérdida de masa del material, los cambios en su estructura molecular, y la evolución de productos de degradación. La evaluación de la biodegradación de los polímeros se lleva a cabo mediante análisis químicos y físicos periódicos de las muestras, siguiendo los métodos prescritos por la norma ASTM 5988-18 (Figura 3). Estos análisis pueden incluir técnicas como espectroscopia infrarroja (FTIR) para detectar cambios en la composición química, análisis de tamaño de partículas para evaluar la fragmentación del material, y mediciones de respiración microbiana para estimar la actividad biológica en el compost o suelo.

La evaluación de la biodegradación de los polímeros se lleva a cabo mediante análisis químicos y físicos periódicos de las muestras, siguiendo los métodos prescritos por la norma ASTM 5988-18.

Figura 3. Metodología de biodegradación según norma ASTM D5988-18



Fuente: elaboración propia

Los resultados obtenidos a partir de los ensayos según la norma ASTM 5988 permiten determinar el grado de biodegradación de los polímeros en condiciones de compostaje o suelo, expresado generalmente como un porcentaje de pérdida de masa o una tasa de descomposición (ASTM, 2018). Estos datos son fundamentales para la evaluación del impacto ambiental de los materiales poliméricos y para la toma de decisiones informadas en cuanto a su uso y disposición final.

Factores que influyen en la biodegradación

La biodegradación de los residuos de plátano es un proceso multifacético influenciado por una interacción dinámica de factores ambientales y microbiológicos en el entorno del suelo. Entre estos factores, la temperatura juega un papel fundamental al influir directamente en la actividad metabólica de los microorganismos descomponedores. Se ha reportado que, a temperaturas más altas, las reacciones enzimáticas y los procesos metabólicos se aceleran, lo que resulta en una mayor tasa de biodegradación. Sin embargo, tanto temperaturas altas (>62°C) como bajas (<4°C) pueden inhibir la actividad microbiana, impactando negativamente en la eficiencia de la biodegradación (Berg y McClaugherty, 2020).

La humedad del suelo es otro factor crucial que afecta la biodegradación de los residuos de plátano. Una humedad adecuada es esencial para mantener la actividad me-

tabólica de los microorganismos y facilitar las reacciones bioquímicas necesarias para la descomposición de la materia orgánica. Por otro lado, la falta de humedad puede limitar la disponibilidad de agua para las células microbianas, mientras que un exceso de humedad puede disminuir la oxigenación del suelo, lo que también puede afectar negativamente la actividad microbiana (Berg y McClaugherty, 2020).

El pH del suelo también desempeña un papel significativo en la biodegradación de los residuos de plátano. La mayoría de los microorganismos descomponedores prefieren un pH neutro a ligeramente ácido para su crecimiento y actividad enzimática. Cambios significativos en el pH del suelo pueden alterar la composición de la comunidad microbiana y, por lo tanto, la eficiencia de la biodegradación. Se sabe que algunos microorganismos pueden tolerar condiciones más extremas de pH, pero en general, un pH óptimo es crucial para mantener la actividad biológica (Puissant et al., 2019).

La composición y diversidad de la comunidad microbiana presente en el suelo son factores determinantes en la biodegradación de los residuos de plátano (Akatwijuka et al., 2024). Esta comunidad está compuesta por una variedad de microorganismos, incluyendo bacterias, hongos y actinomicetos, cada uno de los cuales desempeña roles específicos en la descomposición de diferentes componentes de los residuos de plátano. La presencia de microorganismos especializados en la degradación de componentes específicos, como celulolíticos y lignolíticos, puede influir significativamente en la tasa y eficiencia de la biodegradación (Chen et al., 2020b).

Además, la disponibilidad de nutrientes es un factor limitante importante en la biodegradación de los residuos de plátano. Los microorganismos descomponedores requieren una variedad de nutrientes para su crecimiento y actividad metabólica, incluyendo carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y oligoelementos. La disponibilidad de estos nutrientes en el suelo puede influir en la tasa de biodegradación, y la adición de fuentes de nutrientes puede estimular la actividad microbiana y mejorar la eficiencia de la biodegradación.

El proceso e biodegradación realizado durante la ejecución del proyecto *"Generación de valor agregado y adopción tecnológica para la transformación de los residuos del cultivo de plátano (Musa paradisiaca) en municipios del departamento del Tolima - BPIN 2021000100302"* con muestras de plátano proveniente de los municipios de Herveo y Casabianca, el cual se ha basado en la norma D5988-18, ha considerado el uso de materias primas obtenidas a partir de residuos de plátano, caso específico almidones y fibras extraídas del pseudotallo de la variedad Dominico. Estas muestras han sido mezcladas con inóculo en condiciones óptimas para el desarrollo del proceso (humedad, pH y temperatura), en la figura 4A se evidencian los inóculos sin lograr percibir las muestras debido a que los materiales a degradar han alcanzo su tiempo y tasa de biodegradabilidad. En la figura 4B se identifica la tasa de biodegradabilidad respecto al

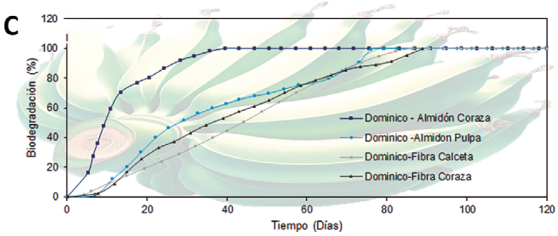
tiempo que las muestras requirieron, finalmente en la Figura 4C se verifica el porcentaje de biodegradación respectivo por cada muestra donde algunas muestras requieren de 24 o hasta 65 días aproximadamente para degradarse completamente.

En este contexto, la biodegradación de compuestos derivados del plátano, como el almidón de pulpa, fibra de calceta, fibra de coraza y almidón de coraza, implica complejos procesos químicos mediada por la acción enzimática de microorganismos presentes en el medio ambiente. A nivel químico, la degradación del almidón de pulpa y coraza comienza con la hidrólisis de los enlaces α-1,4-glucosídicos y, en menor medida, α-1,6-glucosídicos, resultando en la liberación de oligómeros de glucosa y, finalmente, glucosa monomérica (Ma et al., 2024). Esta glucosa es posteriormente metabolizada a través de rutas catabólicas como la glucólisis, produciendo piruvato que puede ingresar en el ciclo de Krebs y, en condiciones aeróbicas, en la cadena de transporte de electrones para la producción de ATP (Mir et al., 2002).

Figura 4. Etapas de biodegradación y presentación de resultados

B

Muestra	Biodegradación (% ± DS)	Tiempo de biodegradación (días)
Dominico – Almidón Coraza	98,83 ± 0,024	24,21
Dominico - Fibra Coraza	99,94±0,004	97,97
Dominico - Fibra Calceta	98,76±0,0156	60,21
Dominico - Almidón Pulpa	98,74±0,0142	64,62



Fuente: elaboración propia

Las fibras de calceta y coraza, ricas en celulosa y hemicelulosa, experimentan un proceso de biodegradación que inicia con la acción de celulasas y hemicelulasas, que hidrolizan los enlaces β-1,4-glucosídicos de la celulosa y los enlaces de la hemicelulosa, respectivamente. La celulosa se descompone en celobiosa y luego en glucosa, mientras que la hemicelulosa produce una mezcla de pentosas y hexosas (Pappu y Gummadi, 2022). La presencia de lignina en la fibra de coraza complica la biodegradación debido a su estructura amorfa y recalcitrante, que requiere ligninasas para romper sus enlaces fenílicos y liberar los componentes celulósicos y hemicelulósicos subyacentes (Reddy, 2021).

La biodegradación de estos compuestos no solo reduce la acumulación de residuos agrícolas, sino que también convierte biomasa compleja en productos más simples y asimilables, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental (Harindintwali et al., 2020).

Viabilidad Ambiental y potencial industrial

La biodegradabilidad de los residuos de plátano es un aspecto fundamental que se debe analizar desde diversas perspectivas para comprender su impacto ambiental y su potencial industrial en mayor profundidad (Kolawole et al., 2022). Este proceso de descomposición natural no solo tiene repercusiones ambientales significativas, sino que también abre la puerta a una serie de oportunidades para su utilización en diferentes sectores industriales (Gupta et al., 2023). En primer lugar, al evaluar la viabilidad ambiental de los residuos de plátano, es importante considerar su capacidad para integrarse en los ciclos naturales de los ecosistemas sin causar impactos negativos. La biodegradación efectiva de estos residuos reduce la acumulación de desechos orgánicos en vertederos y la consiguiente liberación de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a mitigar el cambio climático. Además, al descomponerse, los residuos de plátano liberan nutrientes esenciales en el suelo, lo que mejora su fertilidad y promueve la salud de los ecosistemas terrestres al tiempo que reduce la necesidad de fertilizantes químicos (Notarnicola et al., 2017).

Desde una perspectiva industrial, los residuos de plátano ofrecen una serie de oportunidades para la producción de una variedad de productos sostenibles y económicamente viables. Por ejemplo, pueden ser utilizados como materia prima para la producción de biocombustibles, como el biogás y el bioetanol, a través de procesos de digestión anaerobia y fermentación (Sridhar et al., 2021; Santiago et al., 2022; Ningsih et al., 2024). Estos biocombustibles pueden sustituir los combustibles fósiles convencionales, reduciendo así la dependencia de los recursos no renovables y disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero (Valle et al., 2024; Rashid et al., 2024).

Además, los residuos de plátano biodegradados pueden ser transformados en fertilizantes orgánicos de alta calidad mediante procesos de compostaje y vermicompostaje (Saharia et al., 2024). Estos fertilizantes orgánicos son ricos en nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, y pueden mejorar la fertilidad del suelo, aumentar la producción agrícola y reducir la dependencia de fertilizantes químicos sintéticos, que pueden tener efectos negativos en el medio ambiente y la salud humana (Ferreiro et al., 2024).

Otra aplicación prometedora de los residuos de plátano biodegradables es su uso en la producción de materiales biodegradables y compostables, como películas, envases y bolsas (Verma et al., 2024; Chauhan et al., 2024). Estos materiales pueden ofrecer una alternativa sostenible a los plásticos convencionales derivados del petróleo, reduciendo

así la contaminación por plásticos y los impactos ambientales asociados con su producción y eliminación (Makinde et al., 2024; Yin y Woo, 2024). Además, al ser biodegradables, estos materiales pueden descomponerse de forma segura en el medio ambiente al final de su vida útil, cerrando así el ciclo de vida de los productos y promoviendo la economía circular.

La biodegradabilidad de los residuos de plátano es un aspecto clave que debe ser abordado desde múltiples ángulos para maximizar su potencial ambiental e industrial (Vinay et al., 2024). Al comprender y aprovechar eficazmente esta característica, se pueden crear soluciones innovadoras y sostenibles que contribuyan a la conservación del medio ambiente, la diversificación de la matriz energética y el desarrollo de una economía más circular y resiliente. Sin embargo, es importante seguir investigando y desarrollando tecnologías avanzadas para optimizar los procesos de biodegradación y maximizar el aprovechamiento de los residuos de plátano como recursos renovables y sostenibles en el futuro.

Conclusiones y perspectivas futuras

La investigación sobre la biodegradación de los residuos de plátano ha arrojado luz sobre varios aspectos clave que tienen importantes implicaciones tanto ambientales como industriales. En primer lugar, se ha confirmado la capacidad de los residuos de plátano para descomponerse de manera efectiva en el medio ambiente, lo que ofrece una solución prometedora para la gestión sostenible de estos desechos agrícolas. La comprensión detallada de los factores que influyen en la biodegradación, como la temperatura, la humedad y la actividad microbiana, ha proporcionado una base sólida para el desarrollo de estrategias de gestión de residuos más eficaces y sostenibles.

Además, se ha demostrado el potencial industrial de los residuos de plátano biodegradables como materia prima para una variedad de productos y aplicaciones. Desde la producción de biocombustibles y fertilizantes orgánicos hasta la fabricación de materiales biodegradables y compostables, estos residuos ofrecen una amplia gama de oportunidades para impulsar la transición hacia una economía más circular y sostenible. La utilización de estos recursos renovables no solo puede reducir la dependencia de los combustibles fósiles y los productos petroquímicos, sino que también puede contribuir a la mitigación del cambio climático y la conservación de los recursos naturales.

Sin embargo, a pesar de los avances logrados hasta la fecha, aún quedan importantes áreas de investigación por explorar y optimizar. En particular, se requiere una mayor comprensión de los mecanismos subyacentes de la biodegradación de los residuos de plátano, así como de su interacción con el medio ambiente y la microbiota del suelo. Esto incluye investigaciones sobre la dinámica de la descomposición a nivel molecular

y la identificación de microorganismos clave involucrados en el proceso de biodegradación. Además, se necesitan estudios a largo plazo para evaluar el impacto ambiental y la sostenibilidad a largo plazo de la utilización de residuos de plátano en diferentes aplicaciones industriales.

En términos de perspectivas futuras, es fundamental fomentar la colaboración interdisciplinaria entre científicos, ingenieros, agricultores y responsables de políticas para abordar los desafíos asociados con la biodegradación de los residuos de plátano de manera integral y holística. Esto incluye el desarrollo de tecnologías innovadoras para la recolección, procesamiento y utilización de estos residuos, así como la implementación de políticas y regulaciones que fomenten su aprovechamiento sostenible. Al seguir avanzando en estas áreas de investigación y colaboración, podemos aprovechar plenamente el potencial de los residuos de plátano como recursos renovables y contribuir a un futuro más sostenible y resiliente para las generaciones venideras.

Referencias

Akatwijuka, O., Gepreel, M. A. H., Abdel-Mawgood, A., Yamamoto, M., Saito, Y., y Hassanin, A. H. (2024). Overview of banana cellulosic fibers: agro-biomass potential, fiber extraction, properties, and sustainable applications. Biomass Conversion and Biorefinery, 14(6), 7449-7465.

ASTM. (2018). Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in Soil (ASTM D5988-18). West Conshohocken, PA: ASTM International. https://doi.org/10.1520/D5988-18

Berg, B., y McClaugherty, C. (2020). Plant litter: Decomposition, humus formation, carbon sequestration. In *Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59631-6

Budiyantoro, C., y Yudhanto, F. (2024). Comparative Analysis of Cellulose, Hemicellulose and Lignin on The Physical and Thermal Properties of Wood Sawdust for Bio-Composite Material Fillers. *Revue Des Composites et Des Materiaux Avances*, *34*(1), 109–116. https://doi.org/10.18280/rcma.340114

Chauhan, K., Kaur, R., y Chauhan, I. (2024). Sustainable bioplastic: a comprehensive review on sources, methods, advantages, and applications of bioplastics. Polymer-Plastics Technology and Materials, 63(8), 913-938.

Chen, Y., Wang, W., Zhou, D., Jing, T., Li, K., Zhao, Y., Tang, W., Qi, D., Zhang, M., Zang, X., Luo, Y., y Xie, J. (2020a). Biodegradation of lignocellulosic agricultural residues by a newly isolated Fictibacillus sp. YS-26 improving carbon metabolic properties

and functional diversity of the rhizosphere microbial community. *Bioresource Technology*, *310*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123381

Chen, Y., Wang, W., Zhou, D., Jing, T., Li, K., Zhao, Y., Tang, W., Qi, D., Zhang, M., Zang, X., Luo, Y., y Xie, J. (2020b). Biodegradation of lignocellulosic agricultural residues by a newly isolated Fictibacillus sp. YS-26 improving carbon metabolic properties and functional diversity of the rhizosphere microbial community. *Bioresource Technology*, *310*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123381

Covinich, L. G., y Area, M. C. (2024). Trends and Limitations of Lignin as a Starting Material. In *BioResources* (Vol. 19, Issue 1, pp. 6–9). North Carolina State University. https://doi.org/10.15376/BIORES.19.1.6-9

Doolette, C. L., Gupta, V. V. S. R., Lu, Y., Payne, J. L., Batstone, D. J., Kirby, J. K., Navarro, D. A., y McLaughlin, M. J. (2016). Quantifying the sensitivity of soil microbial communities to silver sulfide nanoparticles using metagenome sequencing. *PLoS ONE*, *11*(8). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161979

Ferreira, A. M., Barros, G. S. V. B., Wojeicchowski, J. P., y Coutinho, J. A. P. (2024). Valorizing banana peels by extracting rutin with hydrated organic acids. *Food Chemistry Advances*, *4*. https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100612

Ferreiro, O., Martin, L. A., Chacon, W. D. C., Duarte, S., Perilla, J. E., y Ayala Valencia, G. (2024). Valorization of Agro‐Industrial Plantain (Musa× paradisiaca) By‐Products: Alternative Sources of Carbohydrates and Bioactive Compounds. Starch‐Stärke, 76(5-6), 2300210.Fitriani, A., Toni, D. R., y Rahmadhia, S. N. (2024). Chemical Characteristics of Kepok Banana Bud (Musa Paradisiaca Linn.) Flakes with Variations of Mocaf Flour. Journal of Functional Food and Nutraceutical, 97-105.

Fotosintéticas, B., Sulfurosas Y Bacterias, N., Lácticas, Á., Biofertilizante, P., y Otero Jiménez, V. (2011). *Aislamiento, Selección e Identificación de Actinomicetos*.

González, M. A. G., Mendoza, E. S., Minsky, N. H. W., y Saucedo, A. L. (2022). Fundamentals and analogies to better understand NMR spectroscopy. *Educacion Quimica*, *33*(4), 3–13. https://doi.org/10.22201/fq.18708404E.2022.4.0.81520

Gupta, G., Baranwal, M., Saxena, S., y Reddy, M. S. (2023). Utilization of banana waste as a resource material for biofuels and other value-added products. Biomass Conversion and Biorefinery, 13(14), 12717-12736.

Haro Velasteguí, A. J., Borja Arévalo, A. E., y Triviño Bloisse, S. Y. (2017). *Analysis on the use of banana waste, as raw material for the production of biodegradable plastic materials*. *3*(2), 506–525. https://doi.org/10.23857/dom.cien.pocaip.2017.3.2.esp.506-525

Harindintwali, J. D., Zhou, J., y Yu, X. (2020). Lignocellulosic crop residue composting by cellulolytic nitrogen-fixing bacteria: a novel tool for environmental sustainability. Science of the total environment, 715, 136912.

Heredia Martín, J. P., y Sánchez Castelblanco, E. M. (2020). *Evaluación de residuos de cáscaras de plátano y yuca para la producción de amilasas a partir de Bacillus amyloliquefaciens A16*. http://elfosscientiae.cigb.edu.cu/Biotecnologia.asp

Hoyos, M., y Rosales, V. (2014). *lipidos: caracteristicas principales y su metabolismo*.

Kolawole, F. O., Kolawole, I. D., Udebhulu, O. D., Kolawole, S. K., Aba, M. M., y Shamaki, P. B. (2022). An Overview of the Sources, Structure, Applications, and Biodegradability of Agricultural Wastes. Hybrid Polymeric Nanocomposites from Agricultural Waste, 21-44.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, (ICONTEC). (2013). *Norma técnica ntc colombiana 5403 calidad de suelo. determinación del carbono orgánico*.

López, G. B., y Gómez Montaño, F. J. (2014). *Propiedades funcionales del plátano (Musa sp)*.

Ma, Y., Morozova, S. M., y Kumacheva, E. (2024). From Nature-Sourced Polysaccharide Particles to Advanced Functional Materials. Advanced Materials, 2312707.

Makinde-Isola, B. A., Taiwo, A. S., Oladele, I. O., Akinwekomi, A. D., Adelani, S. O., y Onuh, L. N. (2024). Development of sustainable and biodegradable materials: a review on banana and sisal fibre based polymer composites. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 37(4), 1519-1539.

Mir, N., y Beaudry, R. (2002). Atmosphere control using oxygen and carbon dioxide. KNEE, M. Fruit quality and its biological basis. Columbus: Sheffield Academic, 122-149.

Ningsih, A. W., Syahrani, A., Septama, A. W., y Sukardiman, S. (2024). Metabolit Profilling and Antibacterial Activity of Ethanol Extract of the Unripe Fruit Peel of Kayu Banana (Musa paradisiaca L. Var. Kayu). Trends in Sciences, 21(2), 7154-7154.

Notarnicola, B., Sala, S., Anton, A., McLaren, S. J., Saouter, E., y Sonesson, U. (2017). The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems: A review of the challenges. Journal of Cleaner Production, 140, 399-409.

Oliveira, L., Cordeiro, N., Evtuguin, D. V., Torres, I. C., y Silvestre, A. J. D. (2007). Chemical composition of different morphological parts from "Dwarf Cavendish" banana plant and their potential as a non-wood renewable source of natural products. *Industrial Crops and Products*, *26*(2), 163–172. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.03.002

Peng, Y., y Wu, S. (2010). The structural and thermal characteristics of wheat straw hemicellulose. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 88(2), 134–139. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.03.006

Puissant, J., Jones, B., Goodall, T., Mang, D., Blaud, A., Gweon, H. S., Malik, A., Jones, D. L., Clark, I. M., Hirsch, P. R., y Griffiths, R. (2019). The pH optimum of soil exoenzymes adapt to long term changes in soil pH. *Soil Biology and Biochemistry*, *138*. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107601

Pappu, J. S. M., y Gummadi, S. N. (2022). Prospects of utilization of various solid agro wastes for making value added products for sustainable development. In Waste Management (pp. 40-59). CRC Press.

Quesada, D., y Gómez, G. (2019). ¿Proteínas de origen vegetal o de origen animal?: Una mirada a su impacto sobre la salud y el medio ambiente. *Revista de Nutrición Clínica y Metabolismo*, *2*(1), 79–86. https://doi.org/10.35454/rncm.v2n1.063

Ralph, J., Lapierre, C., y Boerjan, W. (2019). Lignin structure and its engineering. In *Current Opinion in Biotechnology.* 56, pp. 240–249). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.02.019

Rashid, U., Lee, C. L., Hazmi, B., Gamal, S., y Beygisangchin, M. (2024). Standard specifications for renewable diesel. Renewable Diesel, 33-63.

Reddy, G. V., Ravindra Babu, P., Komaraiah, P., Roy, K. R. R. M., y Kothari, I. L. (2003). Utilization of banana waste for the production of lignolytic and cellulolytic enzymes by solid substrate fermentation using two Pleurotus species (*P. ostreatus* and *P. sajor-caju*). *Process Biochemistry*, *38*(10), 1457–1462. https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00025-6

Reddy, Y. N., Gogde, K., Paul, S., y Bhaumik, J. (2021). Lignin to Platform Chemicals and Biomaterials: Chemical and Biological Perspectives. In Biomass for Bioenergy and Biomaterials (pp. 31-64). CRC Press.

Rodrigues, M. A., Ferreira, C. F., Amorim, E. P., Santos, R. M. F., Martins, F. M., Ledo, C. A. da S., Soares, T. L., y de Santana, J. R. F. (2023). Morpho-anatomical characterization, gene expression and protein cell wall modifications associated with natural finger drop in bananas. *Acta Scientiarum - Agronomy*, *45*. https://doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.58336

Rojas, A. F., Rodríguez-Barona, S., y Montoya, J. (2019). Evaluation of alternatives for energy and bioactive management of plantain peel. Informacion Tecnologica, 30(5), 11–24. https://doi.org/10.4067/S0718- 07642019000500011

Saharia, M., Dey, G., y Kumar, V. (2024). Vermiremediation of plant agro waste to recover residual nutrients and improve crop productivity. In Earthworm Technology in Organic Waste Management (pp. 79-113). Elsevier.

Santiago, B., Moreira, M. T., Feijoo, G., y González-García, S. (2022). Environmental comparison of banana waste valorisation strategies under a biorefinery approach. Waste Management, 142, 77-87.

Saputri, C. A., Julyatmojo, F. A., Harmiansyah, Febrina, M., Mahardika, M., y Maulana, S. (2024). Characteristics of bioplastics prepared from cassava starch reinforced with banana bunch cellulose at various concentrations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1309*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1309/1/012006

Singh, R., Rani, A., Kumar, P., Shukla, G., y Kumar, A. (2017). Cellulolytic Activity in Microorganisms. *Bulletin of Pure & Applied Sciences- Botany*, *36b*(1), 28. https://doi.org/10.5958/2320-3196.2017.00004.0

Smidt, E., Lechner, P., Schwanninger, M., Haberhauer, G., y Gerzabek, M. H. (2002). Characterization of Waste Organic Matter by FT-IR Spectroscopy: Application in Waste Science. *APPLIED SPECTROSCOPY*, *56*(9).

Solano-Apuntes, A., Ponce-Saltos, W., y Zambrano-Gavilanes, F. (2022). Biodigestion Anaerobica De Residuos De Musaceas: Caso Ecuador. Biotempo, 19(1), 51–63. https://doi.org/10.31381/biotempo.v19i1.4803

Sridhar, A., Kapoor, A., Kumar, P. S., Ponnuchamy, M., Balasubramanian, S., y Prabhakar, S. (2021). Conversion of food waste to energy: A focus on sustainability and life cycle assessment. Fuel, 302, 121069.

Strotmann, U., Reuschenbach, P., Schwarz, H., y Pagga, U. (2004). Development and evaluation of an online CO2 evolution test and a multicomponent biodegradation test system. *Applied and Environmental Microbiology*, *70*(8), 4621–4628. https://doi.org/10.1128/AEM.70.8.4621-4628.2004

Valle, C., Voss, M., Calcio Gaudino, E., Forte, C., Cravotto, G., y Tabasso, S. (2024). Harnessing Agri-Food Waste as a Source of Biopolymers for Agriculture. Applied Sciences, 14(10), 4089.

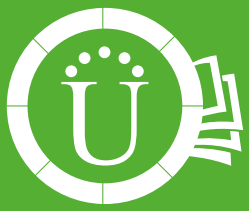
Venegas, R., Torres, A., Rueda, A. M., Morales, M. A., Arias, M. J., y Porras, A. (2022). Development and Characterization of Plantain (Musa paradisiaca) Flour-Based Biopolymer Films Reinforced with Plantain Fibers. *Polymers*, *14*(4). https://doi.org/10.3390/polym14040748

Verma, P., Rani, R., Das, D., Rai, K. K., Gogoi, P., y Badwaik, L. S. (2024). Transformation of banana peel into biodegradable film added with starch and carboxymethyl cellulose and its characterization. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, *37*, 101356. https://doi.org/10.1016/J.SCP.2023.101356

Verma, S. K., Prasad, A., y Katiyar, V. (2024). State of art review on sustainable biodegradable polymers with a market overview for sustainability packaging. Materials Today Sustainability, 100776.

Vinay, G. M., Modi, R. B., y Prakasha, R. (2024). Banana Pseudostem: An Innovative and Sustainable Packaging Material: A Review. Journal of Packaging Technology and Research, 1-13.

Yin, Y., y Woo, M. W. (2024). Transitioning of petroleum-based plastic food packaging to sustainable bio-based alternatives. Sustainable Food Technology.



Sello Editorial
Universidad Nacional
Abierta y a Distancia

Sede Nacional José Celestino Mutis
Calle 14 Sur 14-23
PBX: 344 37 00 - 344 41 20
Bogotá, D.C., Colombia

www.unad.edu.co