



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

Área Académica Agroforestal

Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de producción

*Economía circular aplicable a los residuos de la producción sostenible de
Musa textilis en Costa Rica*

Trabajo Final de Graduación sometido al Tribunal del Área Académica
Agroforestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica para optar por el grado
de Máster en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción

Kevin Alberto Arias Ceciliano

Cartago, Costa Rica

2024

This work is licensed under CC BY-NC 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Este Trabajo Final de Graduación fue aceptado por el Tribunal del Área Académica Agroforestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado de Máster en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción.

Dr. Rooel Campos Rodríguez, Ph. D

Tutor

Ing. María Fernanda Jiménez Morales, M.Sc.

Profesora lectora

Ing. Dagoberto Arias Aguilar, Ph. D.

Presidente del Tribunal

Kevin Alberto Arias Ceciliano

Sustentante

2024

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias a las facilidades brindadas por el grupo de personas productoras de abacá del caserío La Chaves. En especial a Diego Balletero, David Balletero, Freddy Ovaes y al personal de la empresa Nippon Paper. En el trabajo de campo el agradecimiento especial al Dr. Jesús Mora del TEC.

INDICE GENERAL DE CONTENIDOS

INDICE GENERAL DE CONTENIDOS	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	6
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 Introducción	7
1.2. Problema de investigación y su importancia	8
1.3. Objetivos	9
Objetivo General	9
Objetivos específicos	9
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA	10
2.1. Adquisición de datos de biomasa de desechos	10
2.2. Caracterización de las propiedades químicas de la fibra de abacá	10
2.3. Utilización de fibra residual como material compuesto	11
2.4. Análisis estadístico de los datos	11
CAPÍTULO 3: ARTÍCULO CIENTÍFICO	12
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES	23
APENDICES	24

RESUMEN

El cultivo de *Musa textilis* es conocido mundialmente como Abacá o cáñamo de Manila, y durante muchas décadas las fibras del pseudotallo se han utilizado como materia prima de exportación para la fabricación de productos a base de celulosa. Es una de las fibras naturales más resistentes a la salinidad y tiene excelentes propiedades mecánicas, flexibilidad y durabilidad. En América, los dos países líderes en la producción de fibra de Abacá son Ecuador y Costa Rica. Existe una buena base de información sobre los aspectos agronómicos del cultivo, el uso de materiales mejorados, las técnicas de producción de fibra y la caracterización de la calidad. Sin embargo, hay una falta de información sobre la estimación de la producción de residuos y las alternativas para su valorización. La comprensión de la producción de biomasa, las características y los tipos de residuos pueden despertar el interés de productores y empresas para generar nuevos productos dentro del concepto de aprovechamiento de residuos y economía circular. Este trabajo proporciona orientación sobre la estimación de residuos y presenta una propuesta de alternativas para el uso de fibras para agregar valor. Esta investigación también es útil para motivar a los productores de banano en la búsqueda de usos alternativos de los grandes volúmenes de residuos generados en la actividad productiva.

Palabras clave: *Musa textilis*, fibra, biomaterial, bioeconomía

ABSTRACT

The *Musa textilis* crop is known worldwide as Abaca or Manila hemp, and for many decades the pseudostem fibers have been used as export raw material for the manufacture of cellulose-based products. It is one of the most resistant natural fibers to salinity and has excellent mechanical properties, flexibility, and durability. In the Americas, the two leading countries in the production of Abaca fiber are Ecuador and Costa Rica. There is a good base of information on the agronomic aspects of the crop, the use of improved materials, fiber production techniques and quality characterization. However, there is a lack of information on the estimation of the production of residues and the alternatives for their valorization. The understanding of biomass production, characteristics and types of waste can awaken the interest of producers and companies to generate new products within the concept of waste utilization and circular economy. This work provides guidance on the estimation of waste and presents a proposal of alternatives for the use of fibers to add value. This re-search is also useful to motivate the producers of banana in the search for alternative uses of the large volumes of waste generated in the productive activity.

Keywords: *Musa textilis*, fiber, biomaterial, bioeconomy

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Musa textilis es una especie monocotiledónea perteneciente a la familia Musáceas y endémica de Filipinas (Ritcher et al, 2013). Es conocida mundialmente como abacá o “cáñamo de Manila” y es una planta herbácea con una arquitectura de crecimiento similar a las plantas de banano y plátano; aunque a diferencia de éstas, su utilidad comercial no está dirigida a la alimentación, y aunque produce frutos pequeños, su materia prima comercial proviene de las fibras del pseudotallo, las cuales son extraídas mediante técnicas muy rústicas o con asistencia mecánica que ayudan al descortado dejando libres las fibras (Bande et al., 2013; Sharhi et al., 2014).

La fibra es considerada como un potencial sustituto de la madera en la fabricación de pulpa de papel debido a que se caracteriza por sus excelentes propiedades mecánicas (tensión-flexión) y químicas (63% de celulosa, 21% de hemicelulosa, 14% de lignina y 2% de impurezas) (Basliah et al, 2021). Actualmente gran parte del material de la fibra seca se exporta hacia mercados que se especializan en la fabricación de papel de alta calidad y uso especializado como bolsas de té y filtros de diferentes tipos (Vijaya et al., 2014; Sambonino et al., 2017).

El abacá tiene un ciclo de producción que depende de las condiciones del suelo y el clima y la fibra puede alcanzar la madurez entre los 12 y 18 meses (Promotora de Comercio Exterior de Costa Rica, 2024). Para decidir en qué momento la fibra está en condiciones de cosecha, se toma como referencia la presencia de floración en la mayoría de las plantas.

Para obtener fibra de calidad es necesario cosechar los pseudotallos maduros y separar las cáscaras para descortezar la fibra, utilizando máquinas portátiles llamadas “deco”, que proviene de la palabra “decorticar”. Actualmente existen aproximadamente 50 máquinas en el país; sin embargo, recientemente a finales de 2023 se introdujo en el país

la máquina “Spindle”, que mejora la calidad de la limpieza de la fibra, pero requiere de una preparación diferente de las cáscaras que contienen las fibras (ver anexo 1).

El manejo del cultivo y la extracción de fibra generan diversas fuentes de residuos, que van desde hojas y eliminación de los pseudotallos hasta desechos del uso de las máquinas. Se genera un residuo como el bagazo, compuesto por trozos de fibra y residuos de tejido vegetal. También quedan láminas sobrantes de la separación de las capas del pseudotallo. También se generan residuos de fibra semiprocesada. El uso de la máquina “Spindle” genera residuos similares, sin embargo, el mayor volumen de residuos se genera a partir del tuxeado, que se refiere a un proceso específico de desfibrado de la planta para separar las fibras del xilema. Durante el tuxeado se realizan una serie de operaciones mecánicas para extraer las fibras largas y resistentes que componen el abacá, las cuales luego son procesadas con la máquina (Simbaña et al., 2020). Según Valenciano (2019) en un análisis del potencial de los residuos sólidos remanentes del procesamiento del abacá como sustrato para producir hongo ostra (*Pleurotus* spp), dentro de los datos más relevantes proporcionados durante las entrevistas y recorridos, se encontró que la mayor cantidad de residuos obtenidos del procesamiento del abacá, se generan a partir del pseudotallo, donde aproximadamente el 94% son residuos. Por su parte (Jacomé et al., 2023) en un estudio en Ecuador, reportan que del total del material cosechado de abacá, el 96,41% se desperdicia en su proceso y solo el 3,59% es lo que se vende como fibra al mercado internacional.

1.2. Problema de investigación y su importancia

El proceso de extracción de fibra genera un volumen considerable de residuos que no han sido cuantificados en Costa Rica, y no se conoce su valor económico potencial. Se estima que por cada kilo de fibra seca se generan entre 3 y 5 kilos de residuos de materia seca (hojas, fibras y bagazo) y el resto es agua. Además, tomando en consideración que el manejo sostenible del abacá puede traer beneficios sociales, económicos y ambientales, la caracterización de los residuos estaría contribuyendo a reducir la desigualdad social, crear nuevas opciones productivas sostenibles y generar impactos

positivos de acción climática. La gestión eficiente de los recursos naturales contribuye a la estrategia nacional de bioeconomía. Específicamente, al Objetivo de Desarrollo Sostenible y al impacto en el ODS 12: Producción y consumo responsables, que busca alternativas de consumo responsable y valorización de residuos.

1. 3. Objetivos

Objetivo General

Evaluar la generación de los residuos del proceso de extracción de la fibra de abacá para su valoración potencial en subproductos.

Objetivos específicos

- Caracterizar la biomasa completa de las plantas de abacá separada en los diferentes componentes (seudotallo, peciolo, laminas foliares, fibra comercial y residuos).
- Determinar las propiedades químicas y bioquímicas presentes en los residuos y partes de la planta.
- Proponer los usos potenciales de la fibra a través de subproductos de valor agregado enfocados en procesos de bioeconomía.

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA

El estudio se realizó en una finca productiva y representativa de la región Caribe de Costa Rica, específicamente ubicada en el sitio La Chávez en Horquetas de Sarapiquí, Heredia, Costa Rica (10°23'01.6"N, 83°56' 36.1"W, 68 msnm). El sitio presenta un clima de bosque muy húmedo tropical (bmh-T) (Holdridge, 1978); con una precipitación media anual de 4062 mm y una temperatura media anual de 25.9 °C [8]. El suelo se clasifica dentro del orden Ultisol y suborden Humults, [9], con un pH menor a 5.5, una saturación de acidez de 40% y una pendiente muy leve (< 5%).

2.1. Adquisición de datos de biomasa de desechos

Se utilizó un muestreo destructivo a partir de una muestra de 40 pseudotallos. Cada pseudotallo se cortó a una altura de 10 cm del suelo, y se obtuvieron las hojas y el pseudotallo por separado para obtener el peso en kilogramos, tanto en base húmeda como en base seca. El pseudotallo se seccionó en “capas” que se clasificaron en capas externas (segunda calidad) y capas internas (primera calidad), las cuales se decortaron con una máquina “deco” hasta obtener las fibras y los residuos. Las fibras se secaron al sol durante 3 horas hasta alcanzar una humedad de alrededor del 12%. De cada planta se obtuvieron 3 submuestras de tejidos (hojas, pseudotallo, fibras, residuos) y se obtuvo el peso húmedo y el peso seco en una estufa de laboratorio (temperatura ajustada a 80 °C durante 72 h).

2.2. Caracterización de las propiedades químicas de la fibra de abacá

A partir de una colección de 5 variedades diferentes (genotipos) de abacá en un lugar cercano al área de estudio, se realizó una caracterización de las propiedades químicas de las fibras. Se tomaron muestras aleatorias de las fibras y desechos para realizar análisis y pruebas de laboratorio para el uso de las fibras como material compuesto. El material fue procesado en laboratorio, molido y secado en horno. Se evaluaron las propiedades químicas: contenido de lignina y holocelulosa según la norma TAPPI T222

om-02 (2002); así como, extractables en agua fría y caliente según ASTM D1110-21 (2021), extractables en NaOH al 1% según ASTM D1109-21 (2021), extractables con diclorometano según ASTM D1108-21 (2021), extractables con etanol-tolueno según ASTM D1107-21 (2021), contenido de cenizas según ASTM D1102-84 (2021), contenido de volátiles según ASTM D1762-84 (2021), carbono fijo según ASTM D3172-13e1 (2021) y el poder calórico según ASTM D5865/D5865M-19 (2019). Asimismo, se estimó el contenido de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S) con un analizador Elementar modelo Vario Micro Cube (Elementar, Langensfeld, Alemania).

2.3. Utilización de fibra residual como material compuesto

Se elaboraron tableros a partir de combinaciones de aserrín de madera y fibra de desecho de Abacá. Los tableros estuvieron constituidos por una sola capa con dimensiones de 350 x 350 x 12 mm y una densidad estándar objetivo de 0,65 g cm⁻³. Se utilizó el adhesivo disponible en el país y proporcionado por una de las industrias dedicadas a la fabricación de tableros; el cual corresponde al adhesivo Melamina Urea Formaldehído (MUF) con su respectivo catalizador (AkzoNobel 1247/2526, AkzoNobel Wood Coatings, USA), con una carga adhesiva del 12% en base al peso seco de las partículas en una relación 5:1 (adhesivo:catalizador) según instrucciones del fabricante. La viscosidad de dicho adhesivo se caracterizó por tener un valor promedio de 17.500 MPa y un pH de 9,5 a 10,7 (todos los valores a 25 ± 2 °C). Las combinaciones utilizadas como tratamientos fueron las siguientes: T1 (40M:60A), T2 (60M:40A), T3 (50M:50A), T4 (100M:0A) y T5 (0M:100A), donde M es Gmelina arborea y A es Musa textilis.

2.4. Análisis estadístico de los datos

Para los análisis basados en ANOVA se utilizó un diseño completamente aleatorizado, para lo cual se verificaron los supuestos de normalidad de los residuos y la homogeneidad de las varianzas con las pruebas de Shapiro-Wilks y Levene, respectivamente. El ANOVA aplicado consideró un nivel de significancia de 0.05, y determinó si existían diferencias significativas entre tratamientos; en caso de ser necesario, se aplicó la prueba de

comparación de medias según Tukey para identificar grupos de tratamientos con diferente comportamiento. En las situaciones en las que no se cumplieron los supuestos del ANOVA, se ejecutó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis junto con una comparación de medianas en caso de encontrar diferencias significativas. Todos los análisis se realizaron en el software Infostat. 2020e.

CAPÍTULO 3: ARTÍCULO CIENTÍFICO

Esta publicación fue aceptada y presentada en el X Congreso Internacional de Ciencia, Tecnología e Innovación para la Sociedad (CITIS 2024), a realizarse en modalidad virtual entre los días 17 al 19 de julio de 2024 desde el Campus María Auxiliadora de la Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador. Será publicada en Conference Proceedings de Springer.

Circular economy applicable to waste from the sustainable production of *Musa textilis* in Costa Rica.

Kevin Arias-Ceciliano¹ [0000-0001-6720-4356], Rooel Campos Rodríguez²[0000-0003-4460-2313] Dagoberto Arias-Aguilar³[0000-0002-3056-9172], Laura Brenes Peralta⁴[0000-0002-5169-9961], María Fernanda Jiménez Morales⁵ [0000-0002-9775-2545], Manuel Masís Jiménez⁶ [0000-0002-0285-9973] and Jesus Mora-Molina⁷[0000-0002-2309-1940]

¹ Master's Student, ^{1,3} Forestry Engineering School, ^{2,4,5,6} Agribusiness School, ⁷ Chemistry School, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

lncs@springer.com

Abstract

The *Musa textilis* crop is known worldwide as Abaca or Manila hemp, and for many decades the pseudostem fibers have been used as export raw material for the manufacture of cellulose-based products. It is one of the most resistant natural fibers to salinity and has excellent mechanical properties, flexibility, and durability. In the Americas, the two leading countries in the production of Abaca fiber are Ecuador and Costa Rica. There is a good base of information on the agronomic aspects of the crop, the use of improved materials, fiber production techniques and quality characterization. However, there is a lack of information on the estimation of the production of residues and the alternatives for their valorization. The understanding of biomass production, characteristics and types of waste can awaken the interest of producers and companies to generate new products within the concept of waste utilization and circular economy. This work provides guidance on the estimation of waste and presents a proposal of alternatives for the use of fibers to add value. This research is also useful to motivate the producers of banana in the search for alternative uses of the large volumes of waste generated in the productive activity.

Keywords: *Musa textilis*, fiber, biomaterial, bioeconomy

Introduction

Musa textilis is a monocotyledonous species belonging to the Musaceae family and endemic to the Philippines [1]. It is known worldwide as Abaca or “Manila hemp” and is an herbaceous plant with a growth architecture like banana and plantain plants; although unlike these, its commercial utility is not directed towards food, and although it produces small fruits, its commercial raw material comes from the pseudostem fibers, which are extracted using very rustic techniques or with mechanical assistance.

This fiber is considered a potential substitute for wood in the manufacture of paper pulp because it is characterized by excellent mechanical (tension-bending) and chemical properties (63% of cellulose, 21% of hemicellulose, 14% of lignin, and 2% of impurities) [2]. Currently much of the processed material is focused on the manufacture of high-quality paper and specialized use such as tea bags and filters of different types [3,4].

Abaca has a production cycle that depends on soil and climate conditions and the fiber can reach maturity between 12 and 18 months [5].

To obtain quality fiber, it is necessary to harvest the mature pseudostems and separate the shells to decorticate the fiber, using portable machines called “deco”, which comes from the word “decorticate”. There are currently more than 50 machines in the country and their number will increase soon; however, recently at the end of 2023 the “Spindle” machine was introduced in the country, which improves the quality of the decortication and requires a different preparation of the shells containing the fibers.

Crop management and fiber extraction generate various sources of waste, ranging from leaves and thinning of the pseudostems to waste from the use of the “deco” machines. A residue like bagasse is generated, composed of pieces of fiber and plant tissue residues. There are also sheets left over from the separation of the layers of the pseudostem. Semi-processed fiber residues are also generated. The use of the “Spindle” machine generates similar waste; however, the largest volume of waste is generated from tuxing, which refers to a specific process of defibering the plant to separate the fibers from the xylem. During tuxing, a series of mechanical operations are performed to extract the long and resistant fibers that make up the abaca, which are then processed with the machine. According to [6] in an analysis of the potential of the solid waste remaining from Abaca processing as a substrate to produce oyster mushroom (*Pleurotus spp*), within the most relevant data provided during interviews and tours, it was found that the largest amount of waste obtained from processing of Abaca, are generated from the pseudostem, where approximately 94% is waste. For their part [7] in a study in Ecuador, report that of the total harvested Abaca material, 96.41% is wasted in its process and only 3.59% is what is sold as fiber to the international market.

Research Problem and its Importance.

The fiber extraction process generates a considerable volume of waste that has not been quantified in Costa Rica, and its potential economic value is not known. It is estimated that for every kilo of dry fiber, between 3 and 5 kilos of dry matter waste (leaves, fibers and bagasse) are generated and the rest is water. Furthermore, taking into consideration that sustainable management of Abaca can bring social, economic, and environmental benefits, it would contribute to reducing social inequality, creating new sustainable productive options, and generating positive impacts of climate action. Efficient management of natural resources contributes to the national bioeconomy strategy. Specifically, the Sustainable Development Goal and the impact on SDG 12: Responsible production and consumption, which seeks alternatives for responsible consumption and recovery of waste.

2. Methods

The study was carried out on a productive and representative farm of the Caribbean region of Costa Rica, specifically located at the La Chávez site in Horquetas de Sarapiquí, Heredia, Costa Rica (10°23'01.6 "N, 83°56 ' 36.1"W, 68 masl). The site has a very humid tropical forest climate (bmh-T) (Holdridge, 1978); with an average annual precipitation of 4062 mm and an average annual temperature of 25.9 °C [8]. The soil is classified within the order Ultisol and suborder Humults, [9], with a pH less than 5.5, an acidity saturation of 40% and a very slight slope (< 5%).

Acquisition waste biomass data

Destructive sampling was used from a sample of 40 pseudostems. Each pseudostem was cut at a height of 10 cm from the ground, and the leaves and pseudostem were obtained separately to obtain the weight in kilograms, both on a wet basis and on a dry basis. The pseudostem was sectioned into "layers" that were classified into external layers (second quality) and internal layers (first quality), which were decorticated with a "deco" machine until the fibers and waste were obtained. The fibers were dried in the sun for 3 hours until reaching a humidity of around 12%. From each plant, 3 subsamples of tissues were obtained (leaves, pseudostem, fibers, residues) and the wet weight and dry weight were obtained in a laboratory oven (temperature set at 80 °C for 72 h).

Characterization of the chemical properties of abaca fiber in Costa Rica

From a collection of 5 different varieties (genotypes) of Abaca in a place close to the study area, a characterization of the chemical properties of the fibers was carried out. Samples of the fibers and waste were taken randomly to carry out laboratory analysis and tests for the use of fibers as a composite material. The material was processed in the laboratory, ground, and dried in the oven. The chemical properties were evaluated: lignin and holocellulose content according to the TAPPI T222 om-02 standard (2002); as well as, extractives in cold and hot water according to ASTM D1110-21 (2021), extractives in 1%

NaOH according to ASTM D1109-21 (2021), extractables with dichloromethane according to ASTM D1108-21 (2021), extractives with ethanol-toluene according to ASTM D1107-21 (2021), ash content according to ASTM D1102-84 (2021), volatile content according to ASTM D1762-84 (2021), fixed carbon according to ASTM D3172-13e1 (2021) and the caloric value according to ASTM D5865/D5865M-19 (2019). Likewise, the content of carbon (C), hydrogen (H), nitrogen (N) and sulfur (S) was estimated with an Elementar analyzer model Vario Micro Cube (Elementar, Langensfeld, Germany).

Use of residual fiber as composite material

Boards were made from combinations of wood sawdust and Abaca waste fiber. The boards consisted of a single layer with dimensions of 350 x 350 x 12 mm and a target standard density of 0.65 g cm⁻³. The adhesive available in the country and provided by one of the industries dedicated to the manufacture of boards was used; which corresponds to the adhesive Melamine Urea Formaldehyde (MUF) with its respective catalyst (AkzoNobel 1247/2526, AkzoNobel Wood Coatings, USA), with an adhesive load of 12% based on the dry weight of the particles in a 5:1 ratio (adhesive: catalyst) according to the manufacturer's instructions. The viscosity of said adhesive was characterized by having an average value of 17,500 MPa and a pH of 9.5 to 10.7 (all values at 25 ± 2 °C). The combinations used as treatments were the following: T1 (40M:60A), T2 (60M:40A), T3 (50M:50A), T4 (100M:0A) and T5 (0M:100A), where M is *Gmelina arborea* and A is *Musa textilis*.

Statistical analysis of the data

For the analyzes based on ANOVA, a completely randomized design was used, for which the assumptions of normality of the residuals and the homogeneity of the variances were verified with the Shapiro-Wilks and Levene tests, respectively. The ANOVA applied considered a significance level of 0.05, and determined if there were significant differences between treatments; If necessary, the comparison of means test according to Tukey was applied to identify treatment groups with different behavior. In situations in which the assumptions of the ANOVA were not met, the non-parametric Kruskal Wallis test was executed together with a comparison of medians if significant differences were found. All analyzes were run in Infostat software. 2020e [10].

Results

Estimates of biomass, fiber and residues

Table 1 summarizes the results obtained from the study of biomass per plant component. The wet weight of plant pseudostems ranged from 7.8 kg to 34.2 kg, while leaf tissues ranged from 0.8 kg to 4 kg. These values, when summed up, gave total wet weight values ranging from 9 kg to 37.3 kg, with a moisture content ranged from 78.50% to 86%. Likewise, pseudostem dry weight ranged from 0.94 kg to 4.10 kg, while leaf dry weight ranged from 0.21 kg to 1.04 kg. Thus, the total aboveground dry weight ranged from 1.25 kg to 4.96 kg. From a pseudostem residue perspective, approximately 75% of the dry biomass is residue. To this must be added the dry biomass of the leaves, which equals 1.87 kg. If a plantation has approximately 4000 crop stems per hectare, the residual biomass per hectare equals 1.45 tons per hectare. Under the site conditions of this study, a harvest of class 1 and 2 fiber is equivalent to 2.24 tons of anhydrous fiber and 2.50 tons of fiber at 12% moisture content.

Table 1. Summary of the descriptive statistics of the wet and dry biomass of the different components of the Abaca plant

VARIABLES	N	MEAN	SD	VC	MIN	MAX
Height (cm)	40	367,53	64,78	17,63	250	504
Diameter (cm)	40	11,75	1,79	15,26	8,40	16
Stem wet weight (kg)	40	19,33	6,73	34,81	7,80	34,20
Leaf wet weight (kg)	40	1,87	0,84	45,27	0,80	4
Total wet weight (kg)	40	21,19	7,34	34,63	9	37,30
Stem dry weight (kg)	40	2,32	0,81	34,76	0,94	4,10
Leaf dry weight (kg)	40	0,48	0,22	45,29	0,21	1,04
Total dry weight (kg)	40	2,80	0,97	34,71	1,25	4,96
Fiber wet weight (kg) 1	40	2,16	0,87	40,46	0,56	3,99
Fiber dry weight (kg) 1	40	0,42	0,19	45,75	0,01	1,05
Fiber wet weight (kg) 2	40	0,76	0,36	45,12	0,14	1,55
Fiber dry weight (kg) 2	40	0,14	0,07	50,44	0,01	0,36

Note: N is the sample size, SD is the standard deviation of the mean, VC is the coefficient of variation, MIN is the minimum value, MAX is the maximum value. 1 and 2 refers to the quality of the fiber. In Costa Rica, two fiber qualities are currently used, and they differ in the purchase price.

Characterization of the chemical properties of Abaca fiber in Costa Rica

The chemical characterization (Table 2) showed the following conditions: i. For holocellulose, only genotype MT03 showed a significantly different value (87.91%) from the other genotypes, which showed no statistical difference (average 90.67%). ii. Lignin showed variation according to genotype; MT07 and MT11 showed high values (average 14.81%), in contrast to MT01, MT03 and CF01, which were lower at 11.95%. iii. MT07 and MT11 showed the lowest values in cold water, ethanol-toluene, and dichloromethane extractives; in the case of hot water extractives, only MT07 showed significant differences. iv. extractives with sodium hydroxide showed no differences between genotypes; the average value was 1.31%. Elemental analysis showed that MT07 and MT11 indicated statistical differences in the composition of C, H, N and S; in contrast, the remaining three genotypes showed no significant differences among themselves.

Table 2. Fiber chemical properties of five genotypes of *Musa textilis*.

VARIABLE	VARIETY				
	MT01	MT03	MT07	MT11	CF01
Holocellulose (%)	89,62 ^A (0,95)	87,91 ^B (0,46)	89,38 ^A (0,98)	93,06 ^A (0,37)	90,65 ^A (0,56)
Lignin (%)	14,43 ^A (0,28)	15,46 ^A (0,23)	13,49 ^B (0,39)	12,13 ^B (0,26)	12,66 ^B (0,10)
Hot water (%)	11,01 ^A (0,18)	10,17 ^A (0,41)	7,75 ^B (0,24)	10,88 ^A (0,15)	3,90 ^C (0,20)
Cold water (%)	11,27 ^A (0,24)	10,35 ^A (0,22)	6,76 ^B (0,20)	7,33 ^B (0,31)	3,67 ^C (0,16)
Extractives					
Ethanol toluene (%)	11,07 ^A (0,11)	10,43 ^A (0,23)	5,93 ^B (0,15)	7,19 ^B (0,16)	2,14 ^C (0,13)
NaOH 1%	1,33 ^A (0,10)	1,33 ^A (0,09)	1,30 ^A (0,09)	1,32 ^A (0,10)	1,31 ^A (0,09)
Dichloromethane	9,23 ^A (0,11)	9,44 ^A (0,09)	4,56 ^B (0,10)	5,01 ^B (0,09)	4,89 ^B (0,10)
Nitrogen (%)	0,14 ^A (0,02)	0,11 ^B (0,01)	0,09 ^B (0,02)	0,10 ^B (0,02)	0,10 ^B (0,02)
Carbon (%)	62,21 ^A (1,15)	66,44 ^B (0,74)	66,11 ^B (0,50)	66,49 ^B (0,45)	66,57 ^B (0,41)
Hydrogen (%)	6,44 ^A (0,02)	6,72 ^A (0,10)	6,61 ^A (0,12)	6,78 ^A (0,43)	6,90 ^A (0,29)
Sulfur (%)	1,55 ^A (0,09)	1,50 ^A (0,07)	1,32 ^B (0,03)	1,33 ^B (0,02)	0,33 ^B (0,03)

Note: Values in parentheses correspond to the standard deviation; different letters indicate significant differences at 0.05.

Use of fiber as a composite material with wood sawdust

Table 3 shows the mean values corresponding to the property's density, moisture content, and HE Δ . The target standard density of the boards was set at 0.65 g cm⁻³, which classifies them as medium density boards according to the ASTM standard. According to the analysis carried out, the treatment that presented the density closest to the standard value was the control treatment (T4) with an average value of 0.64 g cm⁻³, followed by treatment T2. With what was observed, it is affirmed that as the proportion of *M. textilis* in the mixture increase, the density value decreases, although it is notorious that there were no significant differences between T1, T2 and T3 with the control treatment. These treatments obtained values below the standard target value, which may be due to several reasons; on the one hand, the high probability of losing particles in the demolding phase of the boards, and on the other hand, the variation in thickness caused by the change in temperature and humidity that occurs at the time of transferring the boards from the hot press to the conditioning chamber [11,12].

Table 3. Physical properties of particle boards composed from different proportions of *Musa textilis* and *Gmelina arborea*.

	TREATMENT	Density (g cm ⁻³)	Moisture content (%)	HE Δ (mm)
Average	T1	0,60 AB	15,73 D	0,57 C
	T2	0,61 AB	12,89 A	0,17 AB
	T3	0,58 AB	14,79 C	0,25 B
	T4	0,64 B	12,06 A	0,12 A
	T5	0,57 A	16,08 D	0,52 C

Note: Different letters indicate significant differences at 0.05. HE Δ % corresponds to the swelling in thickness due to a change in moisture content from 12 to 18%.

Table 4 shows the mechanical properties evaluated. Regarding static bending, the modulus of rupture (MOR) showed that treatment T2 did not show significant differences with the control but did show significant differences with the treatments with more than 60% fiber (T1 and T5). Likewise, the modulus of elasticity (MOE) or flexural modulus did not show significant differences between the control treatment (T4) and the other treatments; the fact that treatment T2 (40% fiber) showed the highest value of MOE (17,04 GPa) is noteworthy. In relation to this, the amount of extractives present in the fiber used in this study [13] could contribute to the variations present in the results within the same treatment; since as stated by [14] to obtain the expected mechanical properties in the boards it is necessary that there is chemical compatibility between the components that conform it and additionally [15] also mention the

interaction in the curing of the adhesive. [16] demonstrated the effects of chemical compatibility in boards with palm bagasse. Also, the orientation and distribution of fibers within the board has been shown to influence flexural strength, with incorrect orientation causing a decrease in strength [17].

Table 4. Mechanical properties of composite particleboards with different proportions of *Musa textilis* and *Gmelina arborea* species.

Properties		T1	T2	T3	T4	T5
Static bending (SB)	MOE (GPa)*	10,03A (5,43)	17,04B (7,26)	13,73AB (2,32)	13,76AB (8,02)	8,84A (8,60)
	MOR (MPa)*	22,91AB (3,05)	28,02C (8,45)	26,04ABC (8,39)	28,06BC (5,04)	18,92A (9,20)
Parallel tension (TI)	MOE (MPa)	18,82A (18,10)	58,38B (24,18)	36,57AB (16,09)	104,97C (27,32)	21,54A (14,54)
	Strain maximum (MPa)	0,84A (0,50)	0,98A (0,34)	0,88A (0,31)	2,31B (0,58)	0,78A (0,42)
Tension perpendicular (IB)	Strain maximum (MPa)	0,17A (0,07)	0,25AB (0,06)	0,23AB (0,09)	0,62C (0,06)	0,29B (0,05)
Hardness (H)	Load maximum (kg)	149,13A (32,57)	225,33BC (39,44)	191,78B (20,73)	235,16C (26,86)	141,57A (41,52)

Note: Values in parentheses represent the corresponding standard deviation. Different letters indicate significant differences at 0.05. Parameters marked with an (*) correspond to results analyzed with nonparametric tests (n=10).

Discussion

It is demonstrated in this study that the largest proportion of the total dry biomass of Abaca plants during a fiber harvest corresponds to residues (approximately 40% of the dry biomass). About 20% of these residues contain fibers that are not part of the raw material that can be sold, and the rest are plant tissues and parts of the leaves that do not contain fibers. However, there is great potential for generating compost from this material. Residual fibers can be used locally in composite materials.

Based on the chemical properties of the fibers, the fiber of genotypes MT01 and MT03 was recommended for stationery, biodegradable materials, and fast degradation composites. These products are proposed due to the need for materials with high cellulose and hemicellulose content and low lignin content; as it facilitates the pulping and pulping homogenization process and enhances the creation of higher quality paper [18]. [1] mention that this is the key to have low strength fibers to develop single-use biodegradable biomaterials or short life cycles. Furthermore, [19] recommend using fibers with low mechanical strength

and low lignin levels for environmentally friendly, moderate-use, low value-added materials, which is compatible with both genotypes.

With respect to the use of fiber as a composite material, the gradual reduction of *Musa textilis* fiber proportions promoted progressive increases in density, moisture content, MOR, MOE and IB values. Thus, proportions greater than 40% of *M. textilis* significantly decreased the overall quality of the boards. Despite this, in all treatments with proportions lower than 50 % fiber, the MOR values exceeded the maximum reference points of the standard used. Therefore, the density (0.64 g cm^{-3}), MOR (28.06 MPa) and IB (0.62 MPa) properties of the boards corresponding to treatment T4 (control, 100% wood) met the minimum specifications established for particleboard categorized for use in dry conditions. However, T2 and T3 meet the minimum specifications required in these properties mentioned for low-density LD-2 grade boards.

Conclusions

With respect to the results of the characterization of the fibers, it is demonstrated that there are differences and therefore, the differentiated use of genotypes must be considered for the specific use of fibers in the development of composite materials. It is important to initiate tests with mixtures with plastics to determine the specific uses of biomaterials. It is recommended to continue with new research on the application of different fibers in matrices with polymers and other natural fibers and evaluate the efficiency and quality of the products and the creation of a new market. Therefore, these results are a first step to change the paradigm of *M. textilis* plantations in the tropics.

The quality of the composite boards obtained in this study is susceptible to improvement. The future challenge is to continue experiments to enhance the general properties of the boards. To this end, it is recommended to carry out a broader study that involves other species of lignocellulosic and wood fibers, the use of lower proportions of fiber, the application of pretreatments to the fiber, the use of organic additives with different doses of adhesive and particle sizes.

Acknowledgements

This research is part of the research project "Evaluación del uso Potencial de Fibras Naturales como Biomaterial" code 1431034, with financial support from Vicerrectoría de Investigación of Instituto Tecnológico de Costa Rica, include Dirección de Posgrado.

References

- [1] Richter S., Stromann K., and Mussig J., Abaca (*Musa Textilis*) Grades and Their Properties a Study of Reproducible Fibre Characterization and a Critical Evaluation of Existing Grading Systems, Industrial Crops and Products, Vol. 42, pp.601-612. (2013).
- [2] Bazliah, D., Wulansari, S., Darmawan, A., Idzati, E., Ni'mah, H., Roesyadi, A. y Kurniawansyah, F. Prediction of Kappa number and carbohydrate degradation in oxygen delignification of Abaca fiber. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1053. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1053/1/012015> (2021).

- [3] Vijaya Ramnath, V.M. Manickavasagam, C. Elanchezian, C. Vinodh Krishna, S. Karthik, K. Saravanan. Determination of mechanical properties of intra-layer abaca–jute–glass fiber reinforced composite. *Materials & Design*, Volume 60. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.061> (2014).
- [4] Sambonino, B., Salavarría, J., Mieles, J., Mata, M. Análisis del mercado internacional de la fibra de abacá, su oferta exportable hacia Reino Unido y su aporte en el cambio de la matriz productiva. Segundo Congreso Internacional en Administración de Negocios Internacionales. Universidad Pontificia Bolivariana. (2017).
- [5] Promotora de Comercio Exterior de Costa Rica. Ficha técnica Abacá. Recuperado de <https://www.descubre.cr/wp-content/uploads/2023/04/Ficha-Tecnica-Descubre-Abaca-Mar23.pdf> (2024).
- [6] Valenciano, C. Análisis del potencial de los residuos sólidos remanentes del procesamiento de Abacá (*Musa textilis*), como sustrato para la producción de hongo ostra (*Pleurotus spp*), Zona Huetar Norte y Atlántica, Costa Rica. Universidad Técnica Nacional. Recuperado de <https://repositorio.utn.ac.cr/items/cb379ab5-bec0-44a6-a26b-22ddc7fb3338/full> (2019).
- [7] Jácome, L., Martínez, M. C., De La Cruz, M., Chica, H., & Valencia, X. Rendimiento de fibra de dos variedades de Abacá (*Musa textilis*) en tres densidades de siembra. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2). https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5615 (2023).
- [8] Climate-data. Clima: Las Horquetas (Costa Rica). Climate-data. <https://es.climate-data.org/america-del-norte/costa-rica/heredia/las-horquetas-874786/> (2019).
- [9] Ortiz, E. & Soto, C. Atlas Digital de Costa Rica 2014. [CD-Rom]. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica. (2014).
- [10] Di Rienzo, JA, Casanoves, F., Balzarini, MG, Gonzalez, L., Tablada, M. & Robledo, CW. InfoStat versión 2020e. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar> (2020)
- [11] Mendes, R. F., Mendes, L. M., Mendonça, L. L., Guimarães Júnior, J. B. & Mori, F. A. Qualidade de painéis aglomerados homogêneos produzidos com a madeira de clones de *Eucalyptus urophylla*. *Cerne*, 20, 329-336. <https://doi.org/10.1590/01047760.201420021273> (2014).
- [12] Rangel, L., Moreno, P., Trejo, S. & Valero, S. Propiedades de tableros aglomerados de partículas fabricados con madera de *Eucalyptus urophylla*. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 19(3), 373-386. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2017005000032> (2017).
- [13] Valverde, J. C., Araya, M., Arias-Aguilar, D., Masís, C. & Muñoz, F. Evaluation of the Optimal Uses of Five Genotypes of *Musa textilis* Fiber Grown in the Tropical Region. *Polymers*, 14(9), 1772. <https://doi.org/10.3390/polym14091772> (2020).
- [14] Moya, R., Camacho, D., Oporto, G. S., Soto, R. F. & Mata, J. S. (2014). Physical, mechanical and hydration kinetics of particleboards manufactured with woody biomass (*Cupressus lusitanica*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*), agricultural resources, and Tetra Pak packages. *Waste management & research*, 32(2), 106-114. <https://doi.org/10.1177/0734242X13518959> (2014).

- [15] Han, G., Zhang, C., Zhang, D., Umemura, K. & Kawai, S. Upgrading of urea formaldehyde-bonded reed and wheat straw particleboards using silane coupling agents. *Journal of Wood Science*, 44, 282-286. <https://doi.org/10.1007/BF00581308> (1998).
- [16] Adam, A. B. A., Basta, A. H. & El-Saied, H. Evaluation of palm fiber components an alternative biomass wastes for medium density fiberboard manufacturing. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, 20(4), 579-594. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2018005004601> (2018).
- [17] Nishimura, T., Amin, J. & Ansell, M. P. Image analysis and bending properties of model OSB panels as a function of strand distribution, shape and size. *Wood Science and Technology*, 38(4), 297-309. (2004).
- [18] Moreno, L. O. & Protacio, C. M. Chemical composition and pulp properties of abaca (*Musa textilis* Née) cv. Inosa harvested at different stages of stalk maturity. *Annals of Tropical Research*, 34(2), 45-62. (2012).
- [19] Shibata, M., Ozawa, K., Teramoto, N., Yosomiya, R. & Takeishi, H. Biocomposites made from short abaca fiber and biodegradable polyesters. *Macromolecular materials and engineering*, 288(1), 35-43. <https://doi.org/10.1002/mame.200290031> (2003).

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

El mercado internacional demanda fibras con mejor calidad de descorticado y las empresas que compran la fibra están procurando introducir las mejoras en los métodos de extracción de la fibra y contribuir a la solución de dificultades que, como todo cultivo, van surgiendo con el tiempo.

Con respecto a los resultados de la caracterización de las fibras, se demuestra que existen diferencias y por lo tanto, se debe considerar el uso diferenciado de genotipos para el uso específico de las fibras en el desarrollo de materiales compuestos. Es importante iniciar pruebas con mezclas con plásticos para determinar los usos específicos de los biomateriales. Se recomienda continuar con nuevas investigaciones sobre la aplicación de diferentes fibras en matrices con polímeros y otras fibras naturales y evaluar la eficiencia y calidad de los productos y la creación de un nuevo mercado. Por lo tanto, estos resultados son un primer paso para cambiar el paradigma del uso de las fibras de *M. textilis* en el trópico.

La calidad de los tableros compuestos obtenidos en este estudio es susceptible de mejora. El desafío futuro es continuar con los experimentos para mejorar las propiedades generales de los tableros. Para ello, se recomienda realizar un estudio más amplio que involucre otras especies de fibras lignocelulósicas y de madera, la utilización de menores proporciones de fibra, la aplicación de pretratamientos a la fibra, el uso de aditivos orgánicos con diferentes dosis de adhesivo y tamaños de partícula.

APENDICES

Anexo 1. Máquinas, residuos y fibra de abacá

Máquina Spindle



Máquina Deco



Detalle de la fibra



Residuos

Fuente: imagen propia



Guayaquil, 3 de julio de 2024

Estimados/as autores/as:
Kevin Arias-Ceciliano, Dagoberto Arias-Aguilar, Roal Campos-Rodríguez and Jevn Mora-Molina

De nuestras consideraciones:

Reciban un cordial saludo por parte de los Organizadores del X Congreso Internacional de Ciencia, Tecnología e Innovación para la Sociedad (CITIS 2024), a realizarse en modalidad presencial entre los días 17 al 19 de julio de 2024 desde el Campus Marxe Auxiliadora de la Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador.

Con mucho agrado les notificamos que su trabajo "Circular economy applicable to waste from the sus-tainable production of Musa textilis in Costa Rica" ha sido **ACEPTADO** para su presentación oral en el congreso. En pocos días tendremos listo el programa del evento donde podrá encontrar la fecha y hora de su exposición, el mismo que estará disponible desde este enlace <http://citis.up.edu.ec/programa>. Recuerde que desarrollarla como máximo en 20 minutos suplenando la planilla del congreso, más 5 minutos de preguntas y respuestas de la audiencia.

A continuación, algunas fechas importantes:

Fechas importantes:

- Inscripción y pago de la inscripción de su presencia al Congreso: hasta el 12 de julio de 2024. Más detalles en <http://citis.up.edu.ec/inscripciones>.
- Desarrollo de Workshops (requieren inscripción independiente): 17 de julio de 2024.
- Ceremonia inaugural: 18 de julio de 2024, 09h00.
- Sesiones técnicas: 18 y 19 de julio de 2024, 09h00-17h00.

Me suscribo de ustedes, agradeciéndole la atención brindada a la presente y reiterándole mis consideraciones y respetos.

Atentamente,



Ing. Lenin Cavallo Robalino, Ph.D.
Comité Organizador CITIS 2024
Coordinador de Investigación, Sede Guayaquil
Universidad Politécnica Salesiana



Calle Víaje 12-30 y Elna Lila, Cuenca, Ecuador • Matiz • Casilla 2074 • PBX: (+593) 72050000 • www.up.edu.ec
Revise el sitio web del Congreso: <http://citis.blog.up.edu.ec/>

Certificado de aceptación del artículo y presentación en el X Congreso Internacional de Ciencia, Tecnología e Innovación para la Sociedad (CITIS 2024)

BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL

- Bande, M., Asio, V., Sauerborn, J., & Römheld, V. (2016). Growth Performance of Abaca (Née) *Musa textilis* Integrated in Multistrata Agroecosystems. *Annals of Tropical Research*, 38(1), 19-35. <http://dx.doi.org/10.32945/atr3813.2016>
- Bazliah, D., Wulansari, S., Darmawan, A., Idzati, E., Ni'mah, H., Roesyadi, A. y Kur-niawansyah, F. Prediction of Kappa number and carbohydrate degradation in oxy-gen delignification of Abaca fiber (2021). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1053. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1053/1/012015>
- Jácome, L., Martinez, M. C., De La Cruz, M., Chica, H., & Valencia, X. (2023). Rendimiento de fibra de dos variedades de Abacá (*Musa textilis*) en tres densidades de siembra. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2). https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5615
- Promotora de Comercio Exterior de Costa Rica. Ficha técnica Abacá. Recuperado de <https://www.descubre.cr/wp-content/uploads/2023/04/Ficha-Tecnica-Descubre-Abaca-Mar23.pdf> (2024).
- Richter S., Stromann K., and Mussig J., Abaca (*Musa textilis*). (2013). Grades and Their Properties a Study of Reproducible Fibre Characterization and a Critical Evaluation of Existing Grading Systems, *Industrial Crops and Products*, Vol. 42, pp.601-612.
- Sambonino, B., Salavarría, J., Mieles, J., Mata, M. Análisis del mercado internacional de la fibra de abacá, su oferta exportable hacia Reino Unido y su aporte en el cambio de la matriz productiva. (2017). Segundo Congreso Internacional en Administración de Negocios Internacionales. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Shahri, W., Tahir, I., & Ahad, B. (2014). Abaca fiber: A renewable bio-resource for industrial uses and other applications. *Biomass and Bioenergy: Processing and Properties*, 47-61. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07641-6_3
- Simbaña, E., Ordóñez, P., Guerrero, V., Mera, C., Carvajal, E. (2020). Abaca: cultivation, obtaining fibre and potential uses. Editor(s): Ryszard M. Kozłowski, Maria Mackiewicz-Talarczyk, In *Woodhead Publishing Series in Textiles, Handbook of Natural Fibres*

(Second Edition), Woodhead Publishing, 2020, Pages 197-218.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818398-4.00008-6>

Valenciano, C. (2019). Análisis del potencial de los residuos sólidos remanentes del procesamiento de Abacá (*Musa textilis*), como sustrato para la producción de hongo ostra (*Pleurotus* spp), Zona Huetar Norte y Atlántica, Costa Rica. Universidad Técnica Nacional. Recuperado de <https://repositorio.utn.ac.cr/items/cb379ab5-bec0-44a6-a26b-22ddc7fb3338/full>

Vijaya Ramnath, V.M. Manickavasagam, C. Elanchezhian, C. Vinodh Krishna, S. Karthik, K. Saravanan. Determination of mechanical properties of intra-layer abaca–jute–glass fiber reinforced composite. (2024). *Materials & Design*, Volume 60.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.061>