

## EVALUACIÓN COMPARATIVA DE VARIEDADES DE CACAO Y ADITIVOS EN TÉRMINOS DE LIGNINA Y CELULOSA

**Rolando Zabala<sup>1\*</sup>, Paul Xavier Paguay Soxo<sup>1</sup>, Laura Chuqui<sup>1</sup>, María Augusta Morales León<sup>2</sup>, Angie Gabriela Cevallos Vera<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Grupo de Investigadores, CAUSANA YACHAY, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo sede Orellana, El Coca, Ecuador

<sup>2</sup> Estudiante de Ingeniería Ambiental, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo sede Orellana, El Coca, Ecuador

\*Autor para correspondencia: [rzabala@espoch.edu.ec](mailto:rzabala@espoch.edu.ec)

*Recibido: Diciembre 2024; Aceptado: Enero 2025*

### RESUMEN

Este estudio caracterizó el contenido de lignina y celulosa en tres variedades de cacao (Súper Árbol, Nacional y CCN-51) y en dos aditivos lignocelulósicos (madera de jacarandá y pseudostallos de plátano) para evaluar su potencial uso en aplicaciones industriales. La caracterización química se realizó por triplicado en todas las muestras y se empleó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar diferencias entre los compuestos. La variedad Nacional presentó el contenido más alto de lignina (63,93%) mientras que CCN51 destacó por su composición uniforme, con valores cercanos al 47% en lignina y al 18% en celulosa. En cuanto a los aditivos, la madera de jacarandá presentó un contenido significativamente superior de lignina (56,33%) y celulosa (63,94%) en comparación con el pseudostallos de plátano, que registró valores más bajos, entre 24,67% y 27,10% para lignina, y entre 35,08% y 36,31% para celulosa. El ANOVA indicó que no hubo diferencias significativas en lignina entre los aditivos ( $p = 0,094$ ), pero sí en celulosa ( $p = 0,006$ ). Este estudio aporta información clave sobre las propiedades químicas de estas materias primas, destacando el potencial del cacao y el jacarandá para aplicaciones industriales sostenibles.

**Palabras clave:** Aditivos agrícolas, biomateriales, compuesto orgánico, material lignocelulósico, economía circular.

### ABSTRACT

The use of lignocellulosic materials has gained relevance in industry due to their potential for sustainable applications, particularly within the framework of a circular economy. This study characterized the lignin and cellulose content in three cacao varieties (Súper Árbol, Nacional, and CCN-51) and two lignocellulosic additives (jacaranda wood and banana pseudostem) to evaluate their potential for industrial applications. Chemical characterization was performed in triplicate for all samples, and an analysis of variance (ANOVA) was used to assess differences between the compounds. The Nacional variety exhibited the highest lignin content (63.93%), while CCN-51 stood out for its uniform composition, with values close to 47% for lignin and 18% for cellulose. Regarding the additives, jacaranda wood presented significantly higher lignin (56.33%) and cellulose (63.94%) content compared to the banana pseudostem, which showed lower values, ranging from 24.67% to 27.10% for lignin and from 35.08% to 36.31% for cellulose. The ANOVA revealed no significant differences in lignin content among the additives ( $p = 0.094$ ), but significant differences were observed in cellulose content ( $p = 0.006$ ). This study provides essential insights into the chemical properties of these raw materials, highlighting the potential of cacao and jacaranda for sustainable industrial applications.

**Keywords:** Agricultural additives, biomaterials. Organic compounds, lignocellulosic material, circular economy.

### 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el uso de materiales lignocelulósicos ha ganado atención en diversos campos industriales debido a su potencial para reemplazar materiales sintéticos en aplicaciones sostenibles. Estos compuestos formados principalmente por lignina y celulosa ofrecen propiedades mecánicas

estructurales y químicas que lo hacen ideales para la fabricación de bioplásticos, materiales compuestos, papel, y otros productos ecológicos [1-4]. La creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir el impacto ambiental de los procesos industriales han impulsado la investigación sobre fuentes alternativas y renovables que contribuyan a la economía circular.

En este contexto los subproductos agroindustriales, como los derivados del cacao y materiales lignocelulósicos provenientes de plantas tropicales, emergen como opciones prometedoras. El cacao, además de su relevancia económica y social en países productores como Ecuador, genera biomasa que puede ser valorizada como materia prima en diversas aplicaciones industriales [5-8]. Por su parte, materiales como la madera de jacarandá y el pseudotallo de plátano representan alternativas adicionales debido a su abundancia y características químicas particulares, pero que no han sido exploradas. Por ello, existe una necesidad apremiante de caracterizar estas materias primas y evaluar su potencial industrial, ya que su aprovechamiento eficiente podría contribuir significativamente a la sostenibilidad ambiental y económica.

A pesar de los avances en la investigación de materiales lignocelulósicos, el conocimiento sobre las propiedades químicas específicas de variedades de cacao y aditivos tropicales sigue siendo limitado. Estudios previos han abordado la composición química de materiales lignocelulósicos en general [9-15], pero a nuestro conocimiento nulos son los trabajos que se han centrado en comparar diferentes variedades de cacao y materiales como la madera de jacarandá y el pseudotallo de plátano, particularmente en relación con el contenido de lignina y celulosa. Este vacío en el conocimiento resalta la necesidad de estudios que no solo exploren estas características, sino que también den luz sobre su uso potencial en la industria.

El presente estudio responde a esta problemática mediante la caracterización de lignina y celulosa en tres variedades de cacao (CCN-5, Nacional y Súper Árbol) y dos aditivos lignocelulósicos (madera de jacarandá y pseudotallo de plátano). El objetivo es analizar las propiedades químicas de estas materias primas para determinar su potencial uso en aplicaciones industriales sostenibles.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1. Sitio de estudio

La fase experimental de la caracterización de lignina y celulosa de la cascarilla de cacao de las tres variedades, así como de los aditivos, se realizó en las instalaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) - Estación Experimental Central de la Amazonía, en el laboratorio de Calidad de Alimentos, ubicado en el km 3 de la vía San Carlos.

## 2.2. Determinación de lignina y celulosa de las variedades de cacao y aditivos

Para la determinación de lignina, previamente se realizó una solución de ácido sulfúrico al 72%, para ello, en 250 ml de agua destilada, se añadió levemente 750 ml de ácido sulfúrico concentrado. Posteriormente, se pesó 1 g de la muestra obtenida y se colocó en un vaso de precipitación, donde se añadió 15 ml de ácido sulfúrico en agitación y en baño maría a una temperatura de 20 +/-1°C por un lapso de 2 horas hasta que la muestra tome una tonalidad oscura. Posteriormente, se pesó en el Crisol Poroso P2 y se transfirió el contenido al equipo Dosi Fiber, tomando en cuenta de que el nivel del agua se encuentre hasta la última línea del equipo con la finalidad de obtener ácido sulfúrico al 4%. Se sometió el contenido a ebullición y se contó 4 horas de acción desde cuándo comenzó a hervir. Se decantó la muestra y se lavó con agua destilada caliente el residuo del Crisol Poroso P2. Finalmente, se secó la muestra en una estufa por un lapso de 24 horas a una temperatura de 105 +/- 3°C hasta obtener un peso constante y se dejó enfriar en un desecador para que sea pesado de forma adecuada. El resultado se interpretó a través de la ecuación 1.

$$\% \text{ lignina} = \frac{\text{Peso residuo seco (g)}}{\text{Peso muestra original libre extracto (g)}} * 100 \quad (1)$$

Para la determinación de la celulosa, se pesó 1 g de la muestra obtenida en el Crisol Poroso P2 y se colocó en el equipo Dosi Fiber, donde se añadió 20 ml de etanol y 5 ml de ácido nítrico concentrado. Luego, el contenido se calentó a reflujo por un tiempo de 30 minutos para que sea filtrada. A continuación, el residuo sólido fue nuevamente puesto en digestión con 20 ml de etanol y 5 ml de ácido nítrico concentrado por un lapso de 30 minutos. Posteriormente, se decantó la solución y el residuo sólido fue sometido a una tercera digestión, pero con 100 ml de agua destilada caliente en un lapso de 1 hora. Se filtró el agua y se lavó con agua destilada caliente, se hirvió 30 minutos con 100 ml de solución saturada de acetato de sodio, se decantó la solución y se lavó con 500 ml de agua destilada caliente, respectivamente. Finalmente, se secó la muestra en una estufa por un lapso de 24 horas a una temperatura de 105 +/- 3 ° Centígrados hasta obtener un peso constante y se dejó enfriar en un desecador para que sea pesado de forma adecuada. El resultado se interpretó por medio de la ecuación 2.

$$\% \text{ celulosa} = \frac{\text{Peso residuo seco (g)}}{\text{Peso muestra original libre extracto (g)}} * 100 \quad (2)$$

## 2.3. Análisis estadísticos

Todos los análisis estadísticos de Análisis de Varianza (ANOVA) se realizaron en el software IBM SPSS Statistics 25 a fin de determinar si existen o no diferencias estadísticamente significativas entre los porcentajes de lignina y celulosa para las variedades de cacao y aditivos utilizados.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Análisis de lignina para las variedades de cacao

El procedimiento para la determinación del porcentaje de lignina y celulosa de las tres variedades de cacao (Super Árbol, Nacional y CCN51) se realizó por triplicado para obtener un promedio representativo, tal como se visualiza en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Resultados de laboratorio de lignina y celulosa para las tres variedades de cacao

Lignina							
Variedad de cacao	Código de identificación	Nº muestra	Peso muestr a (g)	Peso crisol (g)	Peso muestra crisol (g)	Resultante (g)	Lignina (%)
Super Árbol	IV23-72	1	1,0020	29,6558	30,0980	0,4422	44,13
	IV23-73	2	1,0022	29,8285	30,2809	0,4524	45,14
	IV23-74	3	1,0006	29,7318	30,2071	0,4753	47,50
Nacional	IV23-75	4	1,0018	29,2448	29,5157	0,2709	27,04
	IV23-76	5	1,0014	29,0630	29,7032	0,6402	63,93
	IV23-77	6	1,0012	29,4843	29,9692	0,4849	48,43
CCN51	IV23-78	7	1,0013	28,4736	28,9403	0,4667	46,61
	IV23-79	8	1,0014	28,4909	28,9658	0,4749	47,42
	IV23-80	9	1,0014	28,2358	28,7143	0,4785	47,78

Celulosa

Variedad de cacao	Código de identificación	Nº muestra	Peso muestra (g)	Peso crisol (g)	Peso muestra crisol (g)	Resultante (g)	Celulosa a (%)
Super Árbol	IV23-72	1	1,0024	28,8065	28,9921	0,1846	18,52
	IV23-73	2	1,0020	28,7948	28,9882	0,1934	19,30
	IV23-74	3	1,0020	29,3237	29,4079	0,0842	8,40
Nacional	IV23-75	4	1,0022	29,4998	29,6863	0,1865	18,61
	IV23-76	5	1,0020	28,3775	28,5586	0,1811	18,07
	IV23-77	6	1,0021	29,5118	29,6734	0,1616	16,13
CCN51	IV23-78	7	1,0029	29,1487	29,3424	0,1937	19,31
	IV23-79	8	1,0023	29,6299	29,7938	0,1639	16,35
	IV23-80	9	1,0019	29,5161	29,7061	0,1900	18,96

El contenido de lignina varió significativamente entre las muestras, desde un 27,04% (Súper Árbol, muestra IV23-75) hasta un 63,93% (Nacional, muestra IV23-76). La variedad Súper Árbol tuvo un rango de lignina del 27,04% al 47,50%, mostrando una variabilidad considerable. La Nacional presentó valores más altos, con un contenido promedio mayor al 48%, mientras que la CNN-51 tuvo valores relativamente homogéneos, entre el 46,61% y 47,78%.

Por otro lado, el rango de celulosa fluctuó entre 8,40% (Súper Árbol, muestra IV23-74) y 19,31% (Súper Árbol, muestra IV23-73 y Nacional, muestra IV23-78). La variedad Súper Árbol aunque muestra la mayor variabilidad en los valores de celulosa, el promedio general es cercano a 18%. En la Nacional, los valores oscilaron entre 16,13% y 19,31% mostrando cierta consistencia, y en la CNN-51 tuvo un rango más estrecho, entre el 16,35% y 18,96% lo que indican uniformidad en esta variedad.

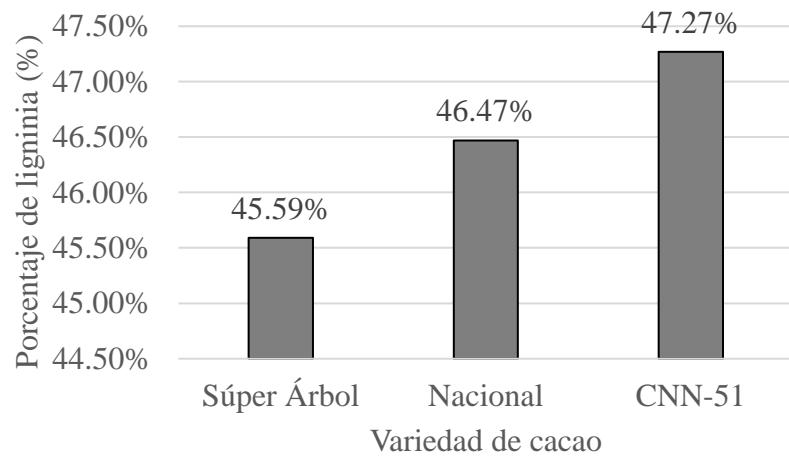
Acorde al ANOVA (Tabla 2), no existieron diferencias significativas entre las medias de los porcentajes de lignina y celulosa para las tres variedades de cacao, ya que el "valor p" obtenido fue de 0,982, y 0,644, respectivamente.

**Tabla 2.** Resultados del ANOVA para lignina y celulosa de las variedades de cacao

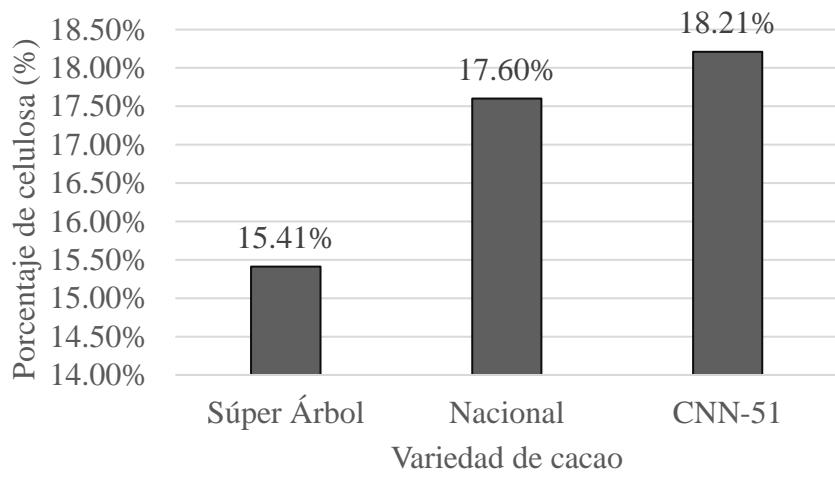
<b>Lignina</b>						
<b>Fuente</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>gl</b>	<b>Media</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	
Entre grupos	4,236	2	2,118	0,018	0,982	
Dentro de grupos	692,918	6	115,486			
Total	697,155	8				

<b>Celulosa</b>						
<b>Fuente</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>gl</b>	<b>Media</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	
Entre grupos	13,029	2	6,151	0,473	0,644	
Dentro de grupos	82,578	6	13,763			
Total	95,608	8				



(a)



(b)

**Figura 1.** Comparación del porcentaje de (a) lignina y (b) celulosa entre las tres variedades de cacao

Gráficamente se observó que el cacao CCN51 fue la variedad con mayor porcentaje tanto para lignina (47,27%), como para celulosa (18,21%), con respecto a las otras dos variedades (Figura 1).

### 3.2. Análisis de lignina y celulosa de los aditivos

El procedimiento para la determinación del porcentaje de lignina de los dos aditivos (Jacarandá y pseudotallo de plátano) se realizó por duplicado para obtener un promedio representativo, tal como se visualiza en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Resultados de laboratorio de lignina y celulosa para los aditivos

Lignina							
Variedad de cacao	Código de identificación	Nº muestra	Peso muestr a (g)	Peso crisol (g)	Peso muestra crisol (g)	Resultante (g)	Lignin a (%)
Jacarandá	IV23-208-1	1	1,0029	29,1186	29,6835	0,5649	56,33
	IV23-208-2	2	1,0029	29,1167	29,5314	0,4147	41,35
Pseudotallo de plátano	IV24-001-1	3	1,0020	29,3775	29,6490	0,2715	27,10
	IV24-001-2	4	1,0020	29,2793	29,5265	0,2472	24,67
Celulosa							
Variedad de cacao	Código de identificación	Nº muestra	Peso muestr a (g)	Peso crisol (g)	Peso muestra crisol (g)	Resultante (g)	Celulos a (%)
Jacarandá	IV23-208-1	1	1,0025	29,3139	29,9164	0,6025	60,10
	IV23-208-2	2	1,0029	29,9143	29,5556	0,6413	63,94
Pseudotall o de plátano	IV24-001-1	3	1,0026	29,1818	29,5335	0,3517	35,08
	IV24-001-2	4	1,0021	29,5693	29,9332	0,3639	36,31

Para la madera de jacarandá el contenido de lignina varió entre 41,35% y 56,33% con un promedio aproximado de 48,84%, mientras que para el pseudotallo de plátano los valores fueron significativamente más bajos entre 24,67% y 27,10%, con un promedio cercano a 25,89%. En el

jacarandá el alto contenido de celulosa fue significativamente alto, variando entre 60,10% y 63,94%, con un promedio cercano a 62,02%, mientras que para el pseudotallo de plátano tuvo un contenido más bajo, entre 35,08% y 36,31% con un promedio de 35,70%.

Para demostrar si existen diferencias significativas entre los dos aditivos se aplicó de igual manera el ANOVA, el cual se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Resultados del ANOVA para lignina y celulosa de los aditivos

**Lignina**

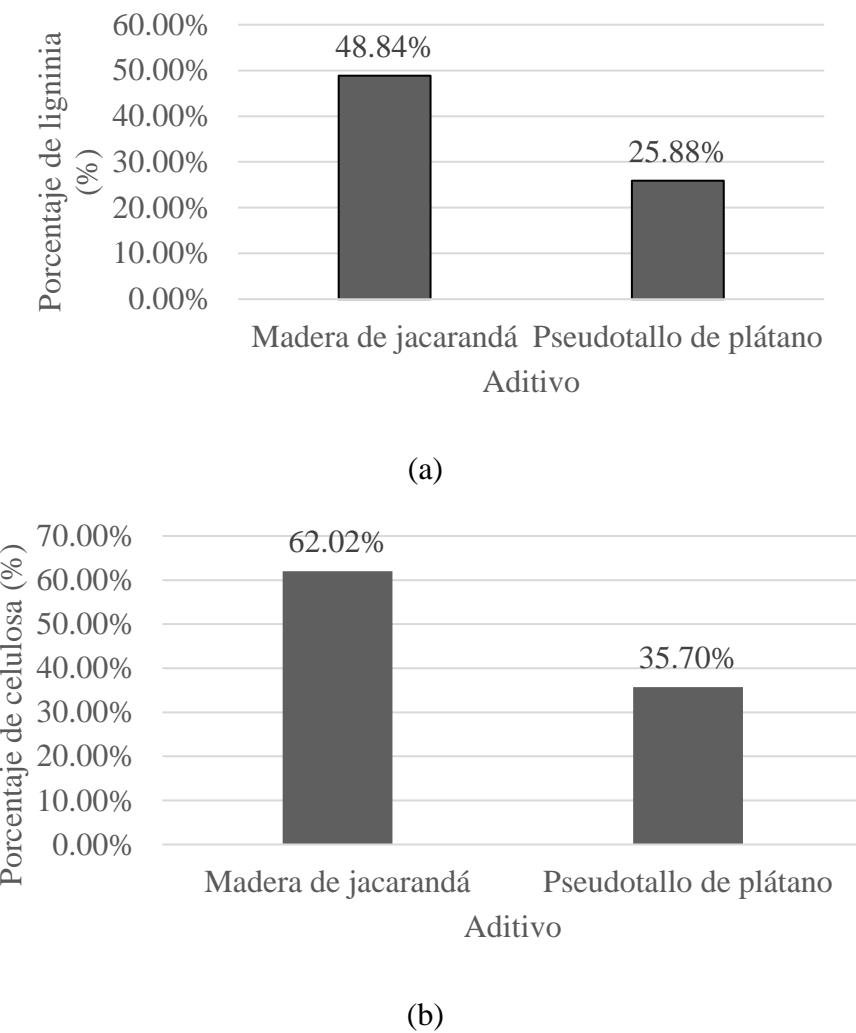
Fuente	Suma de cuadrados	gl	Media	Valor F	Valor p
Entre grupos	526,932	1	526,932	9,152	0,094
Dentro de grupos	115,153	2	57,576		
Total	642,085	3			

**Celulosa**

Entre grupos	693,006	1	693,006	170,497	0,006
Dentro de grupos	8,129	2	4,065		
Total	701,135	3			

Acorde al ANOVA se evidenció que no existen diferencias estadísticamente significativas para lignina en los aditivos ya que mostraron un valor de p de 0,094, pero sí para la celulosa obtenido un valor de significancia de 0,006.

La Figura 2 muestra la comparación de los porcentajes de lignina y celulosa para los dos aditivos utilizados, demostrando que la madera de jacarandá obtuvo un mayor porcentaje en ambos compuestos orgánicos, 48,84% para lignina, y 62,02% para celulosa.



**Figura 2.** Comparación del porcentaje de (a) lignina y (b) celulosa entre los dos aditivos (madera de jacarandá y pseudotallo de plátano)

El análisis de lignina y celulosa en las tres variedades de cacao revela una composición química heterogénea que, aunque no presentó diferencias estadísticamente significativas, evidencia patrones interesantes que pueden tener implicaciones en aplicaciones industriales. La variedad CCN-51, al demostrar una composición más uniforme en ambos compuestos, destaca como una opción prometedora para procesos industriales, donde la consistencia es clave. Estos resultados coinciden con estudios previos que han señalado a la variedad CCN-51 como una de las más homogéneas en cuanto a composición química, lo que la hace favorable para aplicaciones que involucran biomateriales y compuestos lignocelulósicos [16-17].

Por otro lado, las variedades Nacional y Súper Árbol mostraron una mayor variabilidad en sus contenidos de lignina y celulosa, lo cual podría ser un reflejo de diferencias genéticas, condiciones ambientales o técnicas de cultivo. Según investigaciones, esta variabilidad es común en variedades

nativas debido a su mayor diversidad genética, lo que puede ser aprovechado en aplicaciones donde se requieren materiales con propiedades específicas, como papeles especiales o bioplásticos [18-20].

En cuanto a los aditivos, la madera de jacarandá mostró un contenido significativamente mayor de lignina y celulosa en comparación con el pseudotallo de plátano, lo que confirma su idoneidad para aplicaciones que demandan mayor rigidez estructural o resistencia mecánica, como la fabricación de tableros o materiales compuestos de alta densidad. Estos hallazgos están en línea con varios trabajos que han documentado el alto contenido de lignina y celulosa en maderas tropicales, destacando su potencial para aplicaciones industriales sostenibles [21-28].

Por otro lado, el pseudotallo de plátano, con un menor contenido de ambos compuestos, puede ser más adecuado para aplicaciones que prioricen flexibilidad, ligereza y bajo costo, como empaques biodegradables o refuerzo de fibras en materiales híbridos. Estos hallazgos se alinean con resultados de otros estudios quienes han identificado al pseudotallo como una alternativa viable para reducir el desperdicio agroindustrial al tiempo que promueve la sostenibilidad [29-37].

La ausencia de diferencias significativas en los contenidos de lignina entre los aditivos, pero la presencia de diferencias en los valores de celulosa destaca la necesidad de considerar ambos compuestos al evaluar materiales lignocelulósicos. Esto subraya el aporte diferencial de cada aditivo a la industria de biomateriales, particularmente en aplicaciones donde la producción de celulosa es determinante para las propiedades mecánicas o funcionales del producto final [38-43].

Los resultados obtenidos en el presente estudio refuerzan la importancia de la caracterización química en la selección de materias primas para aplicaciones específicas. En el caso de las variedades de cacao, las diferencias observadas, aunque no estadísticamente significativas, ofrecen información valiosa para la industria, particularmente en el diseño de productos donde la uniformidad de la materia prima es un criterio esencial. Asimismo, la caracterización de los aditivos permite identificar su potencial para diferentes industrias, como la de materiales compuestos, construcción de empaques sostenibles, entre otras, promoviendo la economía circular y el uso eficiente de recursos naturales.

Los hallazgos de este estudio contribuyen al campo de los materiales lignocelulósicos al proporcionar una evaluación comparativa de variedades de cacao y aditivos poco explorados en términos de sus características químicas. Los resultados amplían el conocimiento sobre el potencial industrial de estos materiales, destacando la necesidad de enfoques integrales que combinen análisis químicos, propiedades mecánicas y estudios de sostenibilidad para maximizar su aprovechamiento.

#### 4. CONCLUSIONES

El análisis de lignina y celulosa en las tres variedades de cacao permitió evidenciar una variabilidad significativa en su composición química. Aunque las diferencias en los contenidos de ambos compuestos orgánicos entre las variedades no resultaron estadísticamente significativas, se observó que la variedad CCN-51 presentó un contenido más uniforme en ambos compuestos, lo que podría representar una ventaja en términos de consistencia para aplicaciones industriales.

Por otro lado, los aditivos utilizados, madera de jacarandá y pseudotallo de plátano, mostraron diferencias marcadas en sus contenidos de lignina y celulosa. La madera de jacarandá destacó por su alto contenido en ambos compuestos lo que sugiere su potencial como un material de mayor valor para aplicaciones que requieran propiedades mecánicas específicas o mayor rigidez estructural. En contraste el pseudotallo de plátano presentó valores más bajos, lo que podría hacerlo más adecuado para usos en los que se prioricen materiales más flexibles y ligeros.

Este estudio aporta información valiosa para la selección de variedades de cacao y aditivos en función de sus características químicas, lo que podría optimizar procesos industriales y aplicaciones específicas de materiales compuestos y sostenibles. Los resultados sugieren la necesidad de investigaciones futuras que profundicen en el impacto de estas propiedades en aplicaciones prácticas y económicas.

#### 5. REFERENCIAS

1. Fernandes, E. M., Pires, R. A., Mano, J. F., & Reis, R. L. (2013). Bionanocomposites from lignocellulosic resources: Properties, applications and future trends for their use in the biomedical field. *Progress in Polymer Science*, 38(10), 1415–1441.
2. Arevalo-Gallegos, A., Ahmad, Z., Asgher, M., Parra-Saldivar, R., & Iqbal, H. M. N. (2017). Lignocellulose: A sustainable material to produce value-added products with a zero waste approach—A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 99, 308–318.
3. Okolie, J. A., Nanda, S., Dalai, A. K., & Kozinski, J. A. (2021). Chemistry and Specialty Industrial Applications of Lignocellulosic Biomass. *Waste and Biomass Valorization*, 12(5), 2145–2169.
4. Rangappa, S. M., Siengchin, S., Parameswaranpillai, J., Jawaid, M., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Lignocellulosic fiber reinforced composites: Progress, performance, properties, applications, and future perspectives. *Polymer Composites*, 43(2), 645–691.
5. Vásquez, Z. S., de Carvalho Neto, D. P., Pereira, G. V. M., Vandenberghe, L. P. S., de Oliveira, P. Z., Tiburcio, P. B., et al. (2019). Biotechnological approaches for cocoa waste management: A review. *Waste Management*, 90, 72–83.

6. Chávez, J. A. G., Bavieria, J. M. B., & Pérez-Esteve, É. (2022). Valuation Strategies for the Biomass Generated While Producing and Transforming Cocoa into Chocolate. En C. M. Galanakis (Ed.), *Trends in Sustainable Chocolate Production* (pp. 325–350). Springer International Publishing.

7. Ponce, S., Alvarez-Barreto, J., & Almeida, D. (2020). Recent advances in residual biomass conversion into bioenergy and value-added products: A review of the Ecuadorian situation. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, edición especial* (1).

8. Gutiérrez-Macías, P., Mirón-Mérida, V. A., Rodríguez-Nava, C. O., & Barragán-Huerta, B. E. (2021). Cocoa: Beyond chocolate, a promising material for potential value-added products. En R. Bhat (Ed.), *Valorization of Agri-Food Wastes and By-Products* (pp. 267–288). Academic Press.

9. Meshitsuka, G., & Isogai, A. (1996). Chemical Structures of Cellulose, Hemicelluloses, and Lignin. En *Chemical Modification of Lignocellulosic Materials* (pp. 249–342). Routledge.

10. Masarin, F., Gurpilhares, D. B., Baffa, D. C., Barbosa, M. H., Carvalho, W., & Ferraz, A. (2011). Chemical composition and enzymatic digestibility of sugarcane clones selected for varied lignin content. *Biotechnology for Biofuels*, 4(1), 55.

11. Chen, H. (2014). Chemical Composition and Structure of Natural Lignocellulose. En H. Chen (Ed.), *Biotechnology of Lignocellulose: Theory and Practice* (pp. 25–71). Springer Netherlands.

12. Jung, S. J., Kim, S. H., & Chung, I. M. (2015). Comparison of lignin, cellulose, and hemicellulose contents for biofuels utilization among four types of lignocellulosic crops. *Biomass and Bioenergy*, 83, 322–327.

13. Ufodike, C. O., Eze, V. O., Ahmed, M. F., Oluwalowo, A., Park, J. G., Liang, Z., et al. (2020). Investigation of molecular and supramolecular assemblies of cellulose and lignin of lignocellulosic materials by spectroscopy and thermal analysis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 146, 916–921.

14. Ufodike, C. O., Eze, V. O., Ahmed, M. F., Oluwalowo, A., Park, J. G., Okoli, O. I., et al. (2020). Evaluation of the inter-particle interference of cellulose and lignin in lignocellulosic materials. *International Journal of Biological Macromolecules*, 147, 762–767.

15. Kwon, S., Zambrano, M. C., Pawlak, J. J., & Venditti, R. A. (2021). Effect of lignocellulosic fiber composition on the aquatic biodegradation of wood pulps and the isolated cellulose, hemicellulose and lignin components: Kinetic modelling of the biodegradation process. *Cellulose*, 28(5), 2863–2877.

16. Vera Rodríguez, J. H., Jiménez Murillo, W. J., Naula Mejía, M. C., Cárdenas, U. J. V., Zaruma Quito, F. A., & Montecé Maridueña, G. Y. (2021). Residuos de la producción de cacao

(Theobroma cacao L.) como alternativa alimenticia para rumiantes. *Revista Colombiana de Ciencia Animal Recia*, 13(2), 24–29.

17. Díaz-Oviedo, A. F., Ramón-Valencia, B. A., & Moreno-Contreras, G. G. (2022). Caracterización físico-química de la cáscara de mazorca de cacao como posible uso en la elaboración de tableros aglomerados. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 12(1), 97–106.

18. Sabry, F. (2022). Bioplastic: Life in bioplastic is more fantastic. Is it biobased or biodegradable plastics? Is it victory or pure fiction? One Billion Knowledgeable.

19. Hossain, M. T., Shahid, M. A., Akter, S., Ferdous, J., Afroz, K., Refat, K. R. I., et al. (2024). Cellulose and starch-based bioplastics: A review of advances and challenges for sustainability. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 63(10), 1329–1349.

20. Warra, A. A., & Prasad, M. N. (2024). Industrial Crops: Bioresources to Biotechnology. CRC Press.

21. Tye, Y. Y., Lee, K. T., Wan Abdullah, W. N., & Leh, C. P. (2016). The world availability of non-wood lignocellulosic biomass for the production of cellulosic ethanol and potential pretreatments for the enhancement of enzymatic saccharification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 155–172.

22. Braghiroli, F. L., & Passarini, L. (2020). Valorization of biomass residues from forest operations and wood manufacturing presents a wide range of sustainable and innovative possibilities. *Current Forestry Reports*, 6(2), 172–183.

23. Daassi, R., Kasangana, P. B., Khasa, D. P., & Stevanovic, T. (2020). Chemical characterization of tropical ramial and trunk woods and their lignins in view of applications in soil amendments. *Industrial Crops and Products*, 156, 112880.

24. Zevallos Torres, L. A., Lorenci Woiciechowski, A., de Andrade Tanobe, V. O., Karp, S. G., Guimarães Lorenci, L. C., Faulds, C., et al. (2020). Lignin as a potential source of high-added value compounds: A review. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121499.

25. Biswas, S., Rahaman, T., Gupta, P., Mitra, R., Dutta, S., Kharlyngdoh, E., et al. (2022). Cellulose and lignin profiling in seven, economically important bamboo species of India by anatomical, biochemical, FTIR spectroscopy and thermogravimetric analysis. *Biomass and Bioenergy*, 158, 106362.

26. Duruaku, J. I., Okoye, P. A. C., Okoye, N. H., Nwadiogbu, J. O., Onwukeme, V. I., & Arinze, R. U. (2023). An evaluation of the physicochemical, structural and morphological properties of

selected tropical wood species for possible utilization in the wood industry. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 13(4), 131–148.

27. Schubert, M., Panzarasa, G., & Burgert, I. (2023). Sustainability in wood products: A new perspective for handling natural diversity. *Chemical Reviews*, 123(5), 1889–1924.

28. Ahmad, A., Abdul Khalil, H. P. S., Bairwan, R. D., Ahmad, M. I., Abdullah, A. A. A., & Abdullah, C. K. (2024). Sustainable cellulose extraction: Unlocking the potential of tropical fruit peels for advanced materials. *Clean Technologies and Environmental Policy*. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-03110-8>

29. Samanta, K. K., Basak, S., & Chattopadhyay, S. K. (2015). Recycled fibrous and nonfibrous biomass for value-added textile and nontextile applications. En Muthu, S. S. (Ed.), *Environmental Implications of Recycling and Recycled Products* (pp. 167–212). Springer.

30. Castañeda, J. P., Mina, J. H., & Valadez, A. (2021). Potential uses of Musaceae wastes: Case of application in the development of bio-based composites. *Polymers*, 13(11), 1844.

31. Tanasă, F., Teacă, C. A., Nechifor, M., & Zănoagă, M. (2021). Multicomponent polymer systems based on agro-industrial waste. En Kuddus, M. & Roohi (Eds.), *Bioplastics for Sustainable Development* (pp. 467–513). Springer.

32. Bangar, S. P., & Kajla, P. (2024). *Agro-wastes for packaging applications*. CRC Press.

33. Dejene, B. K., & Geletaw, T. M. (2024). Development of fully green composites utilizing thermoplastic starch and cellulosic fibers from agro-waste: A critical review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 63(5), 540–569.

34. Dilkushi, H. A. S., Jayarathna, S., Manipura, A., Chamara, H. K. B. S., Edirisinghe, D., & Vidanarachchi, J. K. (2024). Development and characterization of biocomposite films using banana pseudostem, cassava starch and poly(vinyl alcohol): A sustainable packaging alternative. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 7, 100472.

35. Jayanthi, B., Vinoth, S., Hariharan, M., Raja, R. K., Kamaraj, C., & Narayanan, M. (2024). Valorization of agro-industry wastes for nanocellulose fabrication and its multifunctional applications. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 57, 103124.

36. Juani, M. A., & Navaranjan, N. (2024). Recent advance in biodegradable packaging from banana plant feedstock: A comprehensive review. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, 40(2).

37. Vinay, G. M., Modi, R. B., & Prakasha, R. (2024). Banana pseudostem: An innovative and sustainable packaging material: A review. *Journal of Packaging Technology and Research*, 8(2), 95–107.

38. Abdul Khalil, H. P. S., Davoudpour, Y., Islam, M. N., Mustapha, A., Sudesh, K., & Dungani, R. (2014). Production and modification of nanofibrillated cellulose using various mechanical processes: A review. *Carbohydrate Polymers*, 99, 649–665.

39. George, J., & Sabapathi, S. (2015). Cellulose nanocrystals: Synthesis, functional properties, and applications. *Nanotechnology, Science and Applications*, 8, 45–54.

40. Hamad, W. Y. (2017). Cellulose nanocrystals: Properties, production and applications. John Wiley & Sons.

41. Shaghaleh, H., Xu, X., & Wang, S. (2018). Current progress in production of biopolymeric materials based on cellulose, cellulose nanofibers, and cellulose derivatives. *RSC Advances*, 8(2), 825–842.

42. Tayeb, A. H., Amini, E., Ghasemi, S., & Tajvidi, M. (2018). Cellulose nanomaterials—Binding properties and applications: A review. *Molecules*, 23(10), 2684.

43. Dufresne, A. (2019). Nanocellulose processing properties and potential applications. *Current Forestry Reports*, 5(2), 76–89.