



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA**



Doctorado en Ciencias y Tecnología de la Madera

TESIS DOCTORAL

Determinación de la composición primaria de cuatro especies de fabáceas a través de un método químico (gravimétrico) y un método térmico (TGA-DTG)

Para obtener el grado de doctor en ciencias y tecnología de la madera

Presenta:

M.C. Luis Fernando Pintor Ibarra

Director de tesis: **Dr. José Juan Alvarado Flores**

Co-Director: **Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones**

Morelia, Michoacán, agosto de 2026.

	ÍNDICE	Página
1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	ANTECEDENTES	2
3.	JUSTIFICACIÓN	4
4.	HIPÓTESIS	4
5.	OBJETIVOS	5
	Objetivo general	5
	Objetivos específicos	5
6.	MATERIALES Y MÉTODOS	5
6.1.	Colecta y acondicionamiento de las muestras	5
6.2.	Constitución primaria, análisis proximal por métodos TGA-DTG y químicos	7
6.2.1.	Método termogravimétrico (TGA)	7
6.2.2.	Constitución primaria mediante la deconvolución de la curva de la primera derivada DTG.	7
6.2.3.	Método químico	10
6.2.4.	Análisis proximal	11
6.3.	Poder calorífico superior	11
6.4.	Análisis elemental orgánico e inorgánico	11
6.5.	Análisis estadístico	12
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
7.1.	Constitución primaria, análisis proximal a través del método termogravimétrico (TGA-DTG) y químico.	12
7.2.	Proceso termogravimétrico	15
7.3.	Deconvolución de las curvas DTG	18
7.4.	Poder calorífico superior	21
7.5.	Análisis elemental orgánico e inorgánico	22
7.5.1.	Análisis elemental	22
7.5.2.	Microanálisis de las cenizas	24
8.	CONCLUSIONES	24
9.	BIBLIOGRAFÍA	25
10.	ANEXOS	33

	ÍNDICE DE TABLAS	Página
Cuadro 1	Especificaciones del método TGA-DTG y método químico.	9
Cuadro 2	Composición química y análisis proximal por métodos TGA-DTG y químico de la madera de <i>Acacia farnesiana</i> , <i>A. pennatula</i> , <i>Albizia plurijuga</i> y <i>Prosopis laevigata</i> .	14
Cuadro 3	Análisis y cálculo del poder calorífico superior de las maderas de <i>Acacia farnesiana</i> , <i>A. pennatula</i> , <i>Albizia plurijuga</i> y <i>Prosopis laevigata</i> .	22
Cuadro 4	Elementos orgánicos e inorgánicos en las maderas de <i>Acacia farnesiana</i> , <i>A. pennatula</i> , <i>Albizia plurijuga</i> y <i>Prosopis laevigata</i> .	23

	ÍNDICE DE FIGURAS	Página
Figura 1	Ubicación geográfica de los sitios de colecta de 4 especies de fabáceas en la Cuenca de Lago de Cuitzeo.	6
Figura 2	Diagrama general de la metodología.	6
Figura 3	Diagrama general del análisis proximal por el método químico y TGA.	7
Figura 4	Diagrama de flujo del algoritmo diseñado para la deconvolución del DTG para determinar el análisis proximal y los constituyentes primarios.	8
Figura 5	Diagrama general de la metodología sobre la composición química de las maderas en base al método Van Soest.	11
Figura 6a	Curvas TGA y DTG de la madera de <i>Acacia farnesiana</i> .	16
Figura 6b	Deconvolución de la curva DTG de la madera de <i>Acacia farnesiana</i> .	16
Figura 7a	Curvas TGA y DTG de la madera de <i>A. pennatula</i> .	16
Figura 7b	Deconvolución de la curva DTG de la madera de <i>A. pennatula</i> .	16
Figura 8a	Curvas TGA y DTG de la madera de <i>Albizia plurijuga</i> .	17
Figura 8b	Deconvolución de la curva DTG de la madera de <i>Albizia plurijuga</i> .	17
Figura 9a	Curvas TGA y DTG de la madera de <i>Prosopis laevigata</i> .	17
Figura 9b	Deconvolución de la curva DTG de la madera de <i>Prosopis laevigata</i> .	17
Figura 10	Comparación de curvas DTG de distintas biomásas.	19
Figura 11	Deconvolución de la curva DTG de corteza de pino.	19
Figura 12	Curvas DTG de <i>Sargassum</i> spp, a diferentes velocidades de calentamiento.	19
Figura 13	Deconvolución de la curva DTG de <i>Sargassum</i> spp.	19

Resumen

En la presente investigación se determinó la constitución primaria y el análisis proximal de las maderas de *Acacia farnesiana* (L.) Willd, *Acacia pennatula* (Schl. et Cham) Benth, *Albizia plurijuga* (Standl.) Britton & Rose y *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl.), mediante TGA usando la deconvolución del análisis DTG y por un método químico. Además, el poder calorífico superior se determinó usando bomba calorimétrica y con base en modelos matemáticos. También, se realizó el análisis elemental orgánico e inorgánico. Resultó que, para la celulosa de las maderas de las cuatro especies de fabáceas se cumplió con la hipótesis planteada en este trabajo encontrando resultados consistentes entre el método TGA-DTG y el químico. Igualmente, las hemicelulosas y lignina para las maderas de *Acacia pennatula* y *Albizia plurijuga*. En particular, sólo se encontraron diferencias estadísticas para la madera de *A. farnesiana* en las sustancias extraíbles. En relación con el análisis proximal también se cumplió con la hipótesis planteada encontrando consistencias entre métodos para el contenido de cenizas en las maderas de *Albizia plurijuga* y *Prosopis laevigata*. Asimismo, para la materia volátil en las maderas de *Acacia farnesiana*, *A. pennatula* y *Albizia plurijuga*. Con respecto al poder calorífico superior usando la bomba calorimétrica y en función de los cálculos estimados a partir de la composición química y el análisis proximal para las maderas de *Albizia plurijuga* y *Prosopis laevigata* no se encontraron diferencias estadísticas significativas. En el análisis elemental orgánico de las maderas de cuatro especies de fabáceas se encontró que la concentración de nitrógeno se encuentra por debajo de los parámetros técnicos límite de (N, ≤ 0.5) para su comercialización como biocombustibles sólidos. En la fracción inorgánica se identificaron 18 elementos en las cenizas y los más abundantes fueron; K, Ca, P, Sr, Na y Mg. Se concluye que por el método TGA-DTG fue posible obtener resultados de la composición química básica y análisis proximal de las maderas de cuatro fabáceas, a menor costo, en poco tiempo sin la necesidad de numerosos reactivos químicos en comparación con los procedimientos químicos. De acuerdo con los resultados obtenidos el mejor modelo para calcular el poder calorífico si no se tiene acceso a la bomba calorimétrica es el obtenido con el análisis proximal.

Palabras clave: celulosa, lignina, análisis proximal, TGA-DTG, fabáceas.

Abstract

In this study, the primary composition and proximate analysis of the woods of *Acacia farnesiana* (L.) Willd, *Acacia pennatula* (Schl. et Cham) Benth, *Albizia plurijuga* (Standl.) Britton & Rose, and *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl.) were determined using TGA with DTG deconvolution and a chemical method. In addition, the higher heating value was determined using a calorimetric bomb and based on mathematical models. Organic and inorganic elemental analysis was also performed. It turned out that, for the cellulose in the wood of the four Fabaceae species, the hypothesis proposed in this study was confirmed, with consistent results between the TGA-DTG method and the chemical method. The same was true for the hemicelluloses and lignin in the wood of *Acacia pennatula* and *Albizia plurijuga*. In particular, statistical differences were found only for the extractives in the wood of *A. farnesiana*. With regard to proximate analysis, the hypothesis was also confirmed, with consistency found between methods for the ash content in the woods of *Albizia plurijuga* and *Prosopis laevigata*. Likewise, this was the case for volatile matter in the wood of *Acacia farnesiana*, *A. pennatula*, and *Albizia plurijuga*. With regard to the gross calorific value measured using the calorimetric bomb and based on estimates derived from chemical composition and proximate analysis for the wood of *Albizia plurijuga* and *Prosopis laevigata*, no significant statistical differences were found. Organic elemental analysis of wood from four Fabaceae species revealed that the nitrogen concentration falls below the technical limit of (N, ≤ 0.5) for their commercialization as solid biofuels. In the inorganic fraction, 18 elements were identified in the ash, the most abundant of which were K, Ca, P, Sr, Na, and Mg. It is concluded that the TGA-DTG method made it possible to obtain results on the basic chemical composition and proximate analysis of the wood from four Fabaceae species at a lower cost and in a shorter time, without the need for numerous chemical reagents, compared to conventional chemical procedures. Based on the results obtained, the best model for calculating the calorific value when a calorimetric bomb is not available is the one derived from proximate analysis.

Keywords: cellulose, lignin, proximate analysis, TGA-DTG, fabaceae.

AGRADECIMIENTOS

En este documento me permito agradecer a la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo y a la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, por impulsar mi formación académica, a su vez con el apoyo fundamental de asesor y co-asesor respectivamente el Dr. José Juan Alvarado Flores, Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones, y miembros de mesa sinodal: Dr. Faustino Ruiz Aquino, Rafael Herrera Bucio y Víctor Manuel Ruiz García por enriquecer el presente trabajo con sus valiosos aportes. Asimismo, a la SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación) por el soporte económico proporcionado durante los estudios de posgrado. Finalmente, a las familias Vega-Izquierdo y Pintor-González por la donación de las muestras.

1. INTRODUCCIÓN

México es un país con gran diversidad de especies maderables, donde existe limitada información sobre las propiedades químicas de las diversas especies forestales de su territorio (CONABIO, 2020). Sin embargo, los estudios científicos desarrollados principalmente están centrados en las especies del género *Pinus*, *Quercus* y *Abies* por la razón de constituir la base de la industria forestal mexicana. Por otra parte, se estima que las fabáceas se distribuyen en el 50% del territorio nacional (Rendón *et al.*, 2021), donde solo en los últimos años se han reportado estudios sobre las características químicas y energéticas de algunas maderas usando métodos tradicionales (Salazar-Herrera *et al.*, 2023; Hernández-Méndez *et al.*, 2026). A nivel nacional existen pocas instituciones que desarrollan investigaciones sobre la caracterización química de la biomasa y sus propiedades dendroenergéticas. En los centros de estudio a nivel nacional e internacional se continúan usando las metodologías tradicionales basadas en las normas TAPPI (Asociación Técnica de la Industria de la Pulpa y el Papel, por sus siglas en inglés), ASTM (Sociedad Americana de Ensayos de Materiales, por sus siglas en inglés), ISO (Organización Internacional de Estandarización, por sus siglas en inglés), entre otras (Bustamante *et al.*, 2016). Debido a que forman parte de protocolos ampliamente aceptados por la industria forestal (Sophonrat y Wooldridge, 2024), donde básicamente el cálculo de los componentes primarios de la madera; celulosa, hemicelulosas, lignina, extraíbles y cenizas, se obtiene mediante cálculos gravimétricos. Sin embargo, estas metodologías son; rutinarias, complejas, lentas, costosas y requieren múltiples reactivos químicos (Díez *et al.*, 2020; Espinosa-Negrín *et al.*, 2022). Recientemente, numerosos grupos de investigación en Europa, Asia y América consideran que el TGA (análisis termogravimétrico, por sus siglas en inglés), y la deconvolución de la curva DTG (primera derivada de la curva TGA, por sus siglas en inglés), constituyen una alternativa prometedora para complementar e incluso sustituir parcialmente algunos análisis químicos tradicionales, especialmente en estudios donde se requiere procesar un gran número de muestras o evaluar rápidamente diferentes especies forestales. Esta técnica instrumental permite la determinación de las diferentes etapas de la degradación térmica de la biomasa mediante el proceso de pirolisis en ausencia de oxígeno, donde se distinguen principalmente dos etapas: la pérdida de humedad y la degradación térmica de los tres componentes estructurales de la biomasa: celulosa, hemicelulosas y lignina (Rego *et al.*, 2019). Este método ofrece resultados: con precisión, menor tiempo, repetibilidad y mínima cantidad de reactivos químicos (Saldarriaga *et al.*, 2015; Escalante *et al.*, 2022; Segers *et al.*, 2024; Sophonrat y Wooldridge, 2024). Finalmente, los investigadores seleccionan y aplican una metodología específica según la biomasa que estudian y los recursos disponibles a su alcance (Díez *et al.*, 2020; Escalante *et al.*, 2022).

Recientemente la biomasa ha ganado terreno aportando el 10% del total de la producción energética mundial (Agu *et al.*, 2025). Este material lignocelulósico es un recurso de energía renovable con el beneficio de utilizarse como biocombustibles: sólidos, líquidos y gaseosos. Otra virtud de la biomasa es ser considerada como recurso de energía de carbono cero, por la razón, que la cantidad liberada de CO₂ durante su uso como energía es casi la misma a la cantidad de CO₂ capturada por las plantas a través de la reacción de la fotosíntesis (Rego *et al.*, 2019; Aniza *et al.*, 2024). Además, de ser respetuosa con el medio ambiente en comparación con los combustibles fósiles, a esto se integra que la economía mundial se basa principalmente en combustibles fósiles para producir electricidad, calor, productos químicos, combustibles y

energía, donde su combustión contribuye directamente a la contaminación atmosférica (Popp *et al.*, 2021; Castillo-Tera *et al.*, 2025).

En este trabajo se plantea la caracterización química y energética utilizando el método químico tradicional y a través del análisis termogravimétrico TGA-DTG, con base en el uso de un algoritmo matemático diseñado para las maderas de *Acacia farnesiana*, *A. pennatula*, *Albizia plurijuga* y *Prosopis laevigata*, estas cuatro especies de árboles pertenecen a la familia de fabáceas, estas especies son catalogadas como angiospermas clasificadas como las más diversas a nivel mundial y mejor representadas en México. Habitan bosques caducifolios, crecen en climas semiáridos, son de gran importancia ecológica debido a que fijan el nitrógeno en los suelos erosionados y representan un recurso de importancia económica para las comunidades locales, algunos usos se mencionan a continuación: la madera de *Acacia farnesiana* se utiliza en la construcción rural, postes, cercas, mangos para herramientas, y sus flores aromáticas se emplean en la industria de la perfumería (Rendón *et al.*, 2021). Con respecto a *A. pennatula* sus hojas y frutos se usan como alimento para ganado, su madera se usa como postes de cercados, en la construcción rural, instrumentos, y como combustible (Rico-Arce *et al.*, 2008; Rendón *et al.*, 2021). En el área de distribución de *Albizia plurijuga* su madera se emplea para fines de construcción y en la zona de estudio se utiliza como leña para la cocción de alimentos, postes para delimitar terrenos de cultivo, árbol de ornato y actualmente se está utilizando ampliamente en la reforestación por su rápido crecimiento (Rico-Arce *et al.*, 2008). En cuanto a *Prosopis laevigata* su madera se comercializa para la elaboración de muebles rústicos, artesanías, juguetes, pisos, molduras, puertas, ventanas y en la producción de carbón vegetal, entre otros (Cruz-Montelongo *et al.*, 2020; Palacios *et al.*, 2021). El objetivo de este trabajo es contribuir al desarrollo de nuevas metodologías y al conocimiento químico y energético de las maderas de cuatro fabáceas.

2. ANTECEDENTES

En relación con los estudios previos sobre la composición química de las maderas de las cuatro fabáceas, determinadas por métodos tradicionales destacan los siguientes trabajos:

En los últimos años se ha propuesto a la madera de *Acacia farnesiana* para la fabricación de celulosa para papel, donde el estudio reporta las fracciones de lignina, celulosa, hemicelulosas y cenizas (Ramírez-Casillas *et al.* 2019).

Acerca de la constitución química de la madera y corteza de *A. pennatula* se han realizado algunos trabajos sobre sus características químicas, análisis proximal y poder calorífico (Apolinar-Hidalgo *et al.*, 2017; Jiménez-Mendoza *et al.*, 2023). Recientemente con los subproductos maderables esta especie se han elaborado pellets, evaluando sus propiedades mecánicas y energéticas (Hernández-Méndez *et al.*, 2026).

En relación con *Albizia plurijuga*, se ha reportado de las zonas de albura, duramen y corteza la composición química básica, análisis proximal y poder calorífico (Salazar-Herrera *et al.*, 2023).

De la madera de *Prosopis laevigata*, se encontraron trabajos de los siguientes investigadores; Carrillo *et al.* (2008) documentan la fracción de carbohidratos, lignina Klason y extraíbles en duramen. Por otro lado, Martínez-Pérez *et al.* (2015) reportan el valor calorífico, porcentaje de cenizas y el microanálisis de los elementos inorgánicos en albura, duramen y corteza. Salazar-

Herrera *et al.* (2023) publicaron la composición química básica, análisis proximal y poder calorífico en las zonas albura, duramen y corteza.

Sin embargo, no se dispuso de información relacionada al análisis termogravimétrico TGA-DTG de las maderas de estas 4 fabáceas. Además, existen pocos estudios en otras maderas donde se ha realizado una comparación estadística utilizando pruebas ANOVA, t de Student, Tukey, entre otros. Por otra parte, en los siguientes trabajos se mencionan algunos ejemplos sobre la caracterización química básica y análisis proximal de distintas biomásas a través de la metodología TGA-DTG y el uso de los algoritmos matemáticos para calcular las fracciones de celulosa, hemicelulosas y lignina:

Los primeros informes sobre una metodología fiable que permitía determinar de forma directa el contenido de celulosa y lignina usando Termogravimetría en menor tiempo en comparación con los métodos convencionales fue reportada por Cozzani *et al.* (1997).

Posteriormente Amutio *et al.* (2012) utilizaron metodologías usando modelos cinéticos de pirólisis oxidativa de algunas biomásas con base en procesos de pirólisis, que mediante seis reacciones simultáneas se aplicaron para determinar los análisis proximales y las fracciones correspondientes a hemicelulosas, celulosa y lignina.

Saldarriaga *et al.* (2015), proponen una metodología basada en análisis termogravimétrico, y la deconvolución de la señal DTG mediante la aplicación de un algoritmo para la caracterización de 12 distintas biomásas propuestas como biocombustible. Mediante estos métodos innovadores se realizó el análisis proximal y se calcularon los componentes primarios de la biomasa, es decir, hemicelulosas, celulosa y lignina.

En otro trabajo Bui *et al.* (2016) caracterizaron el contenido de hemicelulosas, celulosa, lignina y algunos extraíbles de dos biomásas acuáticas, basado en metodologías de análisis termogravimétricos y modelos cinéticos obtenidos de su pirolisis.

Por otra parte, Musule *et al.* (2018) obtuvieron el análisis proximal: humedad, carbono fijo y materia volátil mediante termogravimetría en la madera de *Abies religiosa*.

Según Rego *et al.* (2019) reportan que mediante el método TGA-DTG es posible calcular las fracciones de humedad, hemicelulosas, celulosa y lignina de forma rápida y precisa en biomasa de álamo. Además, concluyeron que el contenido de lignina encontrado fue comparable con la determinación por el método tradicional.

Investigaciones realizadas por Díez *et al.* (2020) concluyen que mediante TGA-TKM basado en el modelo cinético de pseudocomponentes, resulta un método eficiente, económico y rápido para la determinación del contenido de la fracción lignocelulósica básica de diferentes tipos de biomasa, desde subproductos agrícolas hasta maderas de coníferas y latifoliadas. Concluyen que método TGA-TKM evita tratamientos químicos complejos y puede emplearse para estimaciones rápidas de composición.

Por otro lado, Alvarado *et al.* (2022) determinaron el análisis proximal mediante termogravimetría y determinaron la composición primaria; celulosa, hemicelulosas y lignina usando la de convolución DTG, en base al algoritmo desarrollado para la biomasa de

Sargassum ssp. En este estudio se comparó la cinética del proceso de pirólisis del sargazo mediante seis modelos diferentes.

Mediante una revisión bibliográfica Escalante *et al.* (2022) exponen el potencial del análisis termogravimétrico, los parámetros cinéticos y la utilidad del DTG para caracterizar materiales lignocelulósicos para la producción de biocombustibles.

Recientemente Sophonrat *et al.* (2024) reportan resultados de los contenidos de celulosas, hemicelulosas y lignina de las maderas de pino, abedul y roble obtenidos mediante TGA y la de convolución DTG. Además, concluyen el método TGA-DTG constituyen una alternativa rápida y confiable para caracterización de biomasa.

3. JUSTIFICACIÓN

México es un país con gran diversidad de especies maderables, donde existe poca información sobre las propiedades químicas de sus recursos forestales (CONABIO, 2020). Sin embargo, para contribuir a usos tecnológicos adecuados de estas materias primas, es de suma importancia conocer sus propiedades, físicas, químicas, térmicas y bioenergéticas (Rutiaga-Quñones *et al.*, 2020; Chávez-Rosales *et al.*, 2021; Gutiérrez-Acosta *et al.*, 2021; Sophonrat y Wooldridge *et al.*, 2024; Aniza *et al.*, 2026). En este sentido existen numerosas técnicas para evaluar la composición química de la biomasa, algunos de los métodos más usados son los químicos, pero estos métodos suelen ser rutinarios y requieren de mucho tiempo. En contraste, existen procedimientos modernos, que ofrecen cuantificaciones más exactas, eficientes, económicas, por ejemplo, el análisis termogravimétrico (TGA-DTG) entre otros (Rego *et al.*, 2019; Díez *et al.*, 2020; Espinosa-Negrín *et al.*, 2022). Resulta que al segundo método pocos investigadores tienen acceso debido a que muchos laboratorios carecen de altos presupuestos económicos para adquirir la balanza termogravimétrica. En este trabajo se plantea evaluar la composición química de la madera de 4 fabáceas utilizando un método químico y otro novedoso con base en el proceso de pirólisis TGA-DTG, los resultados de ambos métodos permitirán discutir; la reproducibilidad, ventajas, desventajas y con fines bioenergéticos.

4. HIPÓTESIS

El análisis termogravimétrico y su diferencial, permite estimar la composición química básica y el análisis proximal de cuatro maderas de la familia Fabaceae, con una precisión equivalente a las técnicas Van Soest y al estándar ASTM, respectivamente.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Determinar los principales componentes químicos de las maderas de 4 especies de fabáceas, a través del análisis termogravimétrico (TGA), usando la deconvolución de su derivada (DTG) con base en el desarrollo del algoritmo para el cálculo de sus principales constituyentes, y por un método químico como blanco de comparación. Además, conocer algunas propiedades energéticas: poder calorífico superior, análisis proximal, microanálisis de cenizas y análisis elemental, para su posible uso dendroenergético.

5.2. Objetivos específicos

- Evaluar la constitución primaria y análisis proximal a través de TGA-DTG y por un método químico de las cuatro maderas de fabáceas.
- Conocer el poder calorífico superior usando bomba calorimétrica y con base a cálculos matemáticos.
- Conocer el análisis elemental orgánico e inorgánico
- Realizar el análisis estadístico de los resultados

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Colecta y acondicionamiento de las muestras

Las muestras de madera se colectaron en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán, México entre las coordenadas 19°57'49''N 101°6'21''O y 19°59'3''N 101°8'45''O (Figura 1), donde se obtuvieron muestras de tres individuos de cada especie de *Acacia farnesiana*, *A. pennatula*, *Albizia plurijuga* y *Prosopis laevigata*, de las cuales se seleccionó una rodaja de 10 cm de espesor a una altura de diámetro a la altura del pecho (1.30 cm). Posteriormente se procedió a separar la corteza, y la madera se astilló de forma manual, una vez habilitadas las astillas se deshidrataron bajo sombra hasta un porcentaje de humedad del 12%. La molienda de las muestras se preparó con base a la norma TAPPI 264 cm-97 (2000), la harina de madera se tamizó en un equipo RO-TAP, se utilizaron mallas estándares ASTM E11-20 (2020), números 20, 40 y 60; la harina malla 40 (425 µm) se utilizó para determinar los análisis: químicos, termogravimétricos, proximales, elemental y poder calorífico superior (Figura 2).

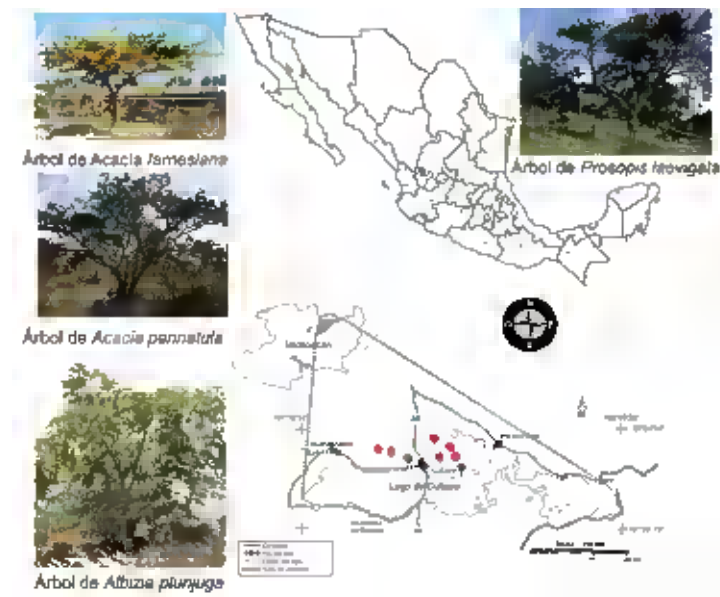


Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios de colecta de 4 especies de fabáceas en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

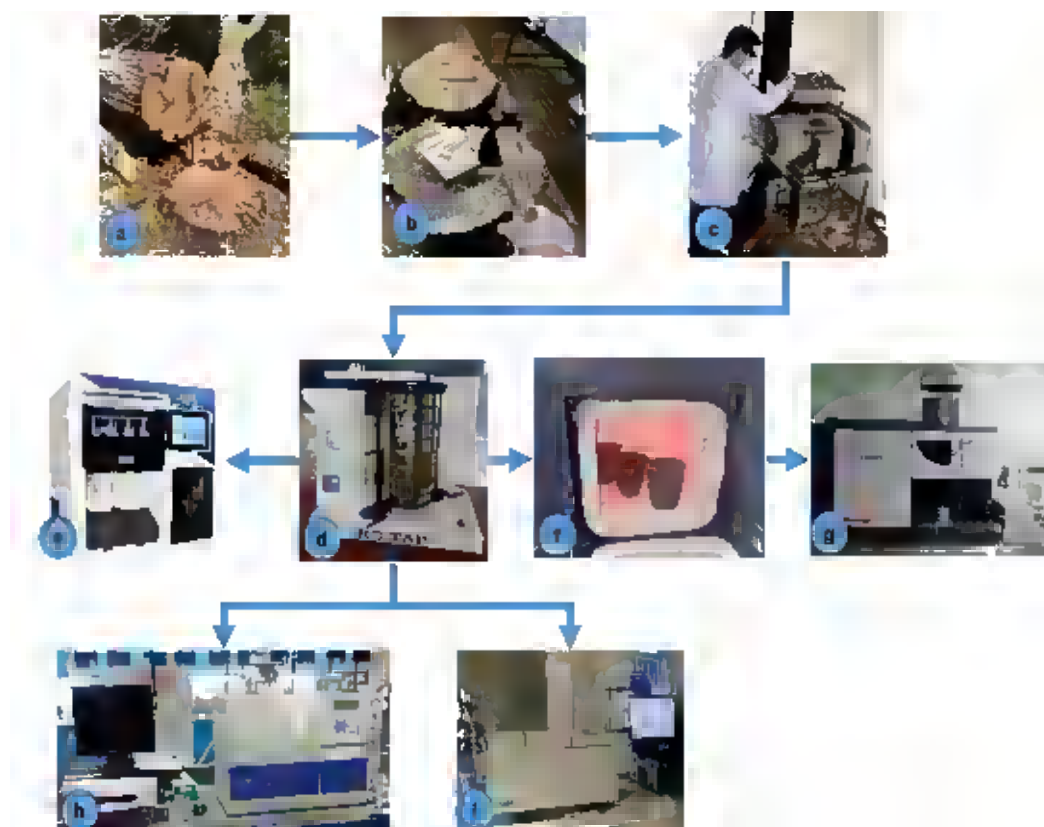


Figura 2. Diagrama general de la metodología. **a)** derribo del árbol, **b)** astillado, **c)** molienda en un equipo convencional, **d)** tamizado, **e)** análisis de la composición química, **f)** análisis proximales, **g)** microanálisis de las cenizas, **h)** análisis elemental, **i)** poder calorífico superior.

6.2. Constitución primaria, análisis proximal por métodos TGA-DTG y químicos

6.2.1. Método termogravimétrico (TGA)

La pirolisis (TGA) de las maderas se obtuvieron en un analizador termogravimétrico PerkinElmer STA 6000 (Pyris™ software) y con base al estándar ASTM D5142 (2017), para la rampa de calentamiento en condiciones controladas fue posible obtener el análisis proximal, posteriormente se obtuvo la curva de la primera derivada DTG por deconvolución y con base en el algoritmo desarrollado fue posible calcular las fracciones de los constituyentes primarios: celulosa, hemicelulosas y lignina en función tiempo y la pérdida de masa de la muestra (Saldarriaga *et al.*, 2015) en la Figura 3 y Cuadro 1 encontraran especificaciones de los métodos.

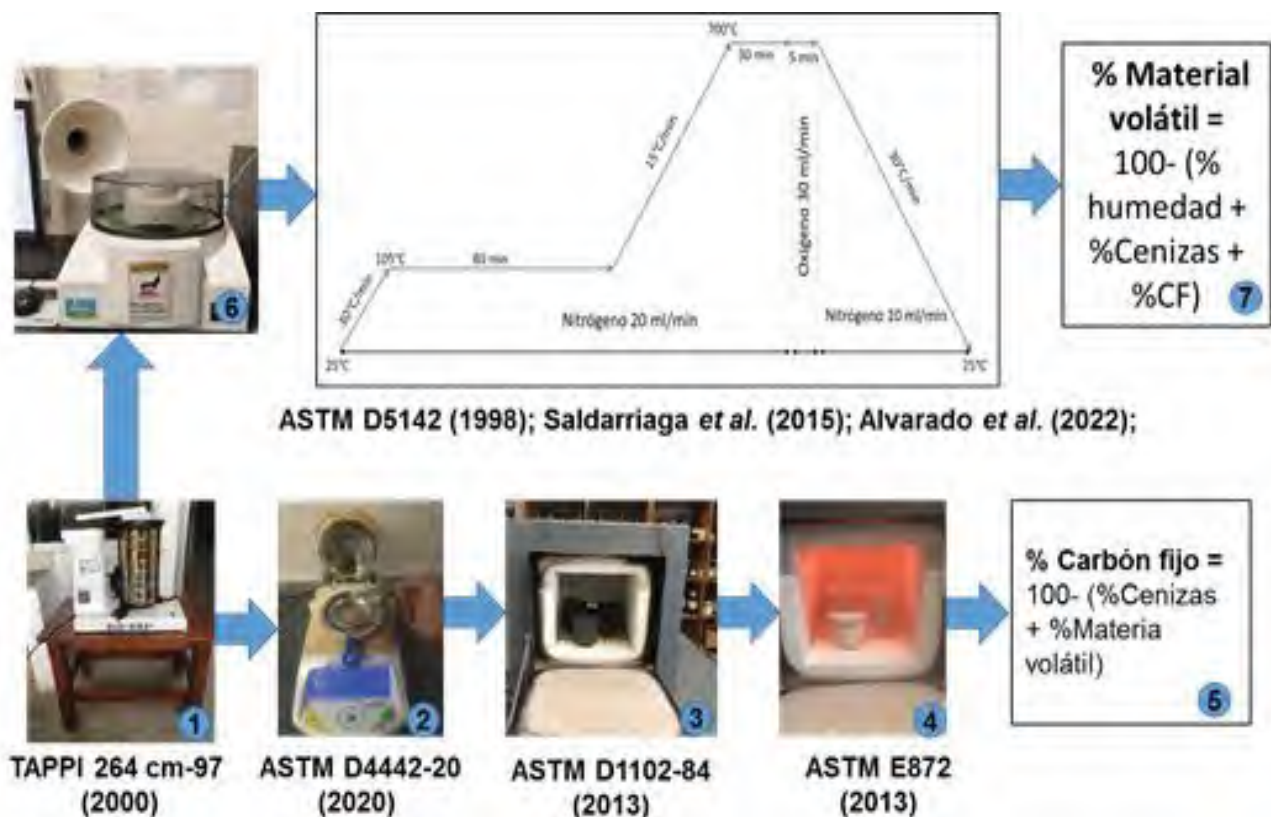


Figura 3. Diagrama general del análisis proximal por el método químico y TGA.

6.2.2. Constitución primaria mediante la deconvolución de la curva de la primera derivada DTG.

En base al algoritmo desarrollado y a partir de los datos del análisis TGA, se calcularon las fracciones de los componentes estructurales de la madera (celulosa, hemicelulosas y lignina), utilizando la deconvolución de la curva de la derivada TGA, que corresponde al análisis DTG, donde el algoritmo permitió obtener las fracciones de los componentes estructurales en función de la pérdida de masa de la muestra a través del tiempo en la figura 4 se presenta las ecuaciones base para los cálculos y la cuadro 1 se menciona información específica.

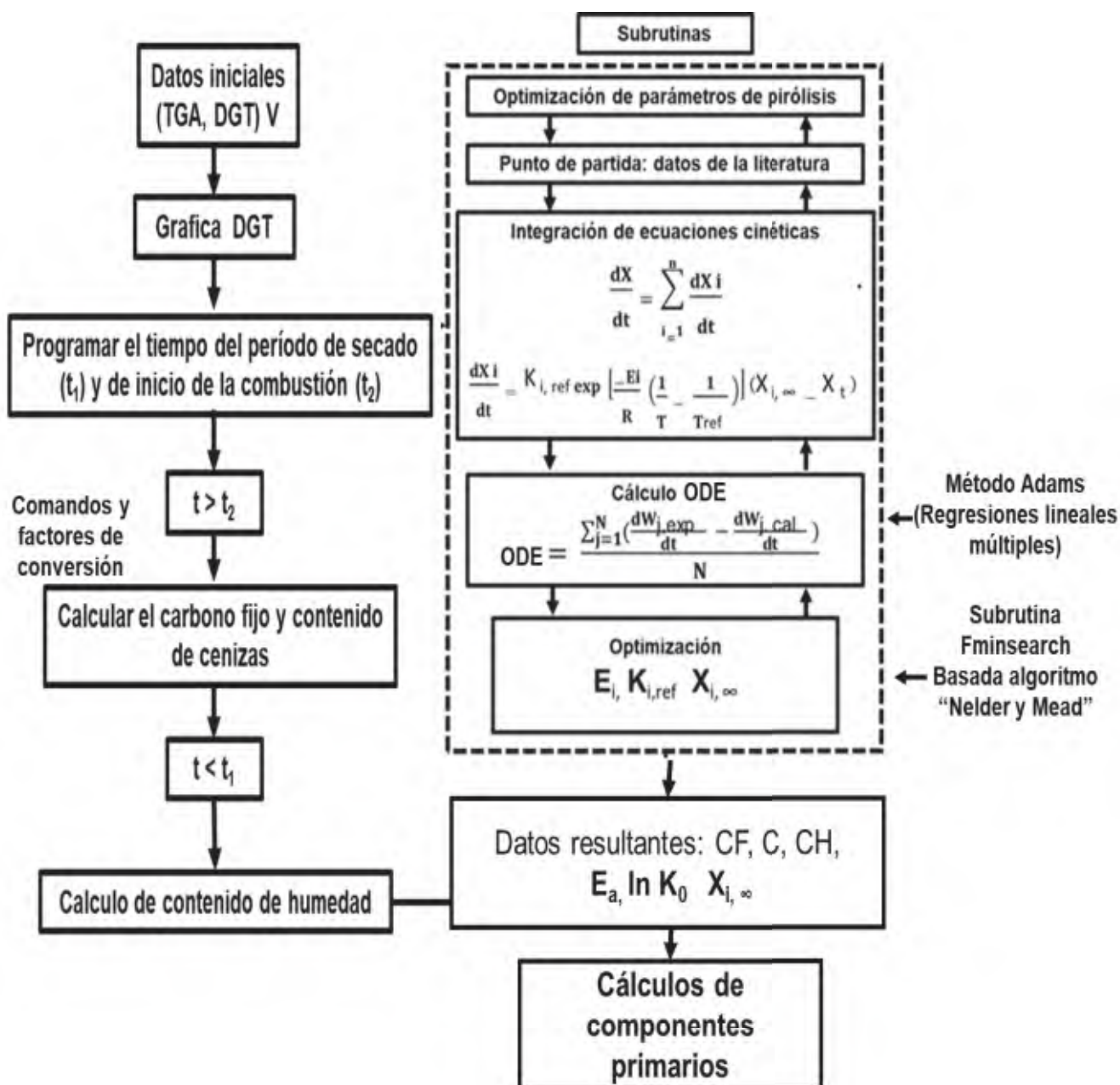


Figura 4. Diagrama de flujo del algoritmo diseñado para la deconvolución del DTG para determinar el análisis proximal y los constituyentes primarios (Saldarriaga *et al.*, 2015).

Cuadro 1. Especificaciones del método TGA-DTG y método químico

Termogravimetría (TGA)	Deconvolución (DTG)	Método químico
La pirolisis se llevó a cabo en atmósfera inerte con gas de nitrógeno (N₂) de 99.99% de pureza con un flujo de 20 mL/min, las velocidades de calentamiento y enfriamiento fueron de 30°C/min, divididas en cuatro etapas, en este proceso se obtuvo el análisis proximal. Etapas: se inició con una temperatura de 25 a 100 °C, por un periodo de 80 min. en esta etapa se obtuvo el % humedad. Etapas: 100°C hasta 700°C durante 30 min, se determinó el cálculo del carbono fijo. Etapas: se aplicó oxígeno durante 5 min. a 700°C, para eliminar los residuos de materia orgánica Etapas: enfriamiento de 700°C a 25°C en un tiempo de 20 min. el residuo restante permitió obtener la fracción de cenizas. La materia volátil se calcula: % materia volátil = [100 – (% humedad + % cenizas + % carbono fijo)]	Se utilizó la deconvolución DTG para determinar los constituyentes primarios: celulosa, hemicelulosas y lignina. Las gráficas de las curvas obtenidas se trazaron en la plataforma Scilab. Se utilizó la subrutina ODE (ecuaciones diferenciales ordinarias, por sus siglas en inglés) basada en el método Adams para problemas ODE no rígidos que integra las regresiones lineales múltiples de la ecuación diferencial. Para calcular la función ODE, se construye una función que contiene las ecuaciones diferenciales ordinarias utilizando operadores aritméticos. Esto se logra identificando el número de variables que cambian con el tiempo y las tasas de cambio correspondiente que permiten calcular los porcentajes de los componentes principales de la biomasa: hemicelulosas, celulosa y lignina. Esta suele ser la parte más compleja, ya que hay que construir la función de optimización, es decir, garantizar en última instancia que Scilab encuentre los mejores valores para que el modelo matemático prediga los resultados experimentales. Para lograrlo, se busca la combinación de parámetros de ajuste que minimice el valor de una función objetivo error, que en este caso es la diferencia entre los resultados calculados con el modelo y los medidos experimentalmente. A continuación, se calcula la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo, la conversión de cada polímero y la conversión global, y a partir de ahí se puede calcular la relación de cambio prevista por el modelo con esa combinación de parámetros de ajuste.	Análisis de fibras y análisis proximal, los cálculos de los resultados se obtuvieron en base a peso anhidro: Fibra detergente neutra (NDF): Digestión con 20 g de Na₂SO₃, 4 mL de α-amilasa a 100 °C durante 75 min. Posteriormente lavado con H₂O caliente y CH₃CH₃, deshidratado a 100 °C durante 24 H. Fibra detergente ácida (ADF): Esta etapa se lleva a cabo con 20g de C₁₉H₄₂BrN en 1L de H₂SO₄ 1N durante 60 min. Después se realiza un lavado con H₂O caliente y CH₃CH₃, deshidratado a 100 °C durante 24 H. Lignina insoluble (IL): Digestión con H₂SO₄ al 72% durante 90 min., lavado con H₂O caliente y deshidratado a 100 °C durante 24 H.

De cada muestra se obtuvieron más de 80 mil datos. Tiempo requerido para el procedimiento = 160 minutos por muestra.	La optimización de los parámetros cinéticos para el ajuste de los resultados experimentales se obtuvo con la subrutina <i>Fminsearch</i> , basada en el algoritmo de Nelder y Mead. Para calcular los porcentajes de agua, carbono fijo y cenizas, se tiene en cuenta el valor inicial de la masa, así como los tiempos de inicio y finalización del proceso de secado. Posteriormente, se tiene en cuenta el tiempo de inicio del proceso de pirolisis y se integran comandos en Scilab para calcular los porcentajes de agua, carbono fijo y cenizas. Además, se integran factores de conversión para la masa (gramos), el tiempo (segundos) y la temperatura (Celsius). Los extraíbles se calcularon por diferencia: % extraíbles = [100 - (% celulosa + % hemicelulosas + % lignina + % cenizas)].	% Carbono fijo = [100 - (% cenizas + % materia volátil)]. Tiempo requerido para el procedimiento = 76 horas por lote de 16 muestras.
---	---	---

6.2.3. Método químico

El análisis secuencial para las fracciones de fibra constituye una alternativa ampliamente utilizada porque las interferencias importantes pueden evitarse y porque el uso de la muestra es más económico. Su principal ventaja es que las estimaciones de hemicelulosas y celulosa por diferencia son más precisas de forma secuencial (Van Soest *et al.*, 1991).

La caracterización química de las maderas se realizó en un equipo ANKOM-200, con base en la metodología reportada por Van Soest *et al.* (1991). Cada una de estas etapas se describen en el cuadro 1 y figura 5. Los cálculos se realizaron con base en la diferencia de peso anhidro de la muestra, se determinaron en el siguiente orden: porcentaje fibra detergente neutra (FDN), fibra detergente ácida (FDA), fibra detergente lignina (FDL) y cenizas, de acuerdo con las ecuaciones del 1 a 4 reportadas por Torres *et al.* (2017).

- | | |
|-------------------------------|-----|
| % Extraíbles = 100 - %FDN | (1) |
| % Hemicelulosas = %FDN – %FDA | (2) |
| % Celulosa = %FDA - %FDL | (3) |
| % Lignina = %FDL - % Cenizas | (4) |

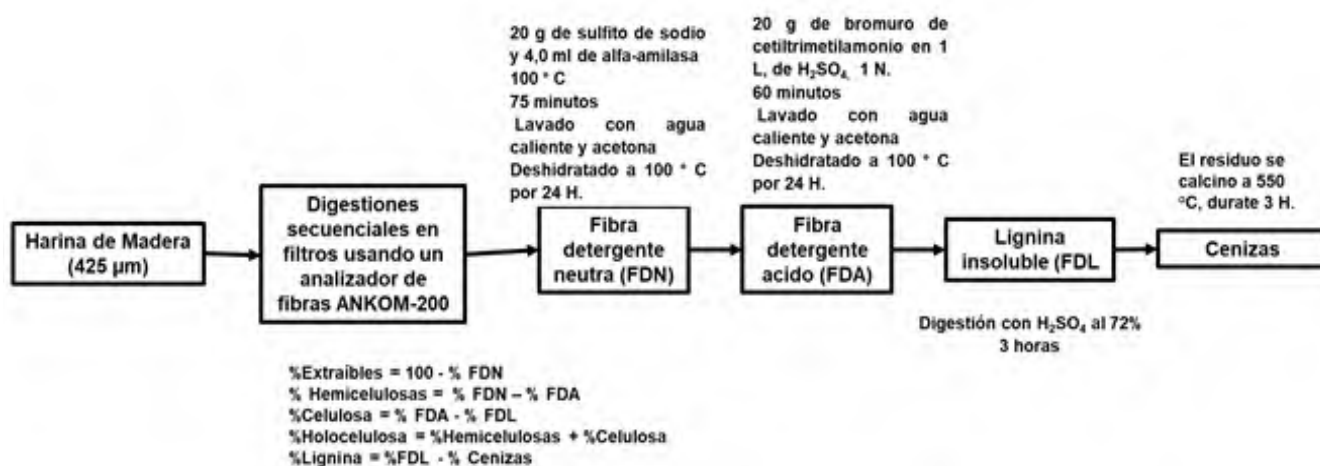


Figura 5. Diagrama general de la metodología sobre la composición química de las maderas en base al método Van Soest.

6.2.4. Análisis proximal

La humedad se obtuvo con ayuda de una termobalanza de acuerdo a la norma ASTM D4442-20 (2020). Las cenizas se calcularon en apego a la norma ASTM D1102-84 (2013) y la materia volátil en base a la norma ASTM E872-82 (2013). El carbono fijo se calculó por diferencia, % carbono fijo = $[100 - (\% \text{ cenizas} + \% \text{ materia volátil})]$ de acuerdo a Ngangyo *et al.* (2022).

6.3. Poder calorífico superior

El poder calorífico se obtuvo en una bomba calorimétrica (LECO AC 600) de acuerdo con los parámetros de UNE-EN ISO 18125 (2018). Por otra parte, se calculó el poder calorífico utilizando modelos matemáticos: considerando la fracción de lignina y extraíbles de la composición química $[\text{poder calorífico} = 17.9017 + 0.07444 (\text{lignina}) + 0.0661 (\text{extraíbles})]$ de acuerdo a White (1987). También en referencia al análisis proximal considerando el carbono fijo y la materia volátil $[\text{poder calorífico} = 354.3 (\text{carbono fijo}) + 170.8 (\text{materia volátil})]$ en base a datos de Cordero *et al.* (2001). Finalmente se realizó el cálculo en función del análisis elemental según Demirbaş (1997), $[\text{poder calorífico} = 0.335 (\text{carbono}) + 1.423 (\text{hidrogeno}) - 0.154 (\text{oxígeno}) - 0.145 (\text{nitrógeno})]$.

6.4. Análisis elemental orgánico e inorgánico

El análisis elemental de las maderas se realizó en un equipo Perkin-Elmer, modelo 2400 CHNS-O bajo condiciones de operación según Rotz y Giazzi (2012). El azufre se calculó mediante el método turbidimétrico con goma arábica, y el contenido de oxígeno se calculó por diferencia en base a reportes de Ghetti *et al.* (1996). Los elementos inorgánicos de las cenizas se identificaron en un espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) (VARIAN 730-ES, Varian Inc.), con base en las recomendaciones de Arcibar-Orozco *et al.* (2014).

6.5. Análisis estadístico

Para la constitución primaria, análisis proximal por método TGA-DTG, método químico y poder calorífico, se realizó un análisis de varianza y una prueba Tukey ($p \leq 0.05$) empleando el programa R Studio (2020) para cada variable de respuesta: celulosa, hemicelulosas, lignina, extraíbles, cenizas, humedad, carbono fijo y materia volátil. Para el análisis elemental se reporta el valor medio y su desviación estándar ($\pm$), en caso particular del microanálisis de cenizas solo se realizó una determinación.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Constitución primaria, análisis proximal a través del método termogravimétrico (TGA-DTG) y químico.

Los métodos tradicionales químicos requieren del uso de diversas sustancias químicas donde si no se tiene un manejo adecuado de los residuos generados durante el procedimiento, por ejemplo, los filtrados del lavado pueden ocasionar daños al medio ambiente, además de ser rutinarios. Por otra parte, el método termogravimétrico TGA-DTG ofrece resultados de los constituyentes químicos y del análisis proximal con la mínima cantidad de sustancias químicas, menor riesgo de incendio, en menor tiempo y preciso (Rego *et al.*, 2019; Escalante *et al.*, 2022). Una desventaja de esta metodología en comparación con el método químico, es que por TGA-DTG se obtienen resultados por muestra, aunque existen equipos actuales que pueden analizar más muestras a la vez y mediante el método químico se pueden analizar a la vez hasta 16 muestras dependiendo de la capacidad de los equipos.

Los resultados de la constitución primaria de la madera de las cuatro fabáceas revelaron que se cumplió con la hipótesis planteada en este trabajo encontrando resultados consistentes entre el método termogravimétrico y el método químico para el principal componente de la madera que corresponde a la celulosa (Cuadro 2). Lo que coincide, con otros autores quienes han demostrado que mediante análisis termogravimétrico se obtienen resultados de celulosa comparables con los métodos tradicionales (Carrier *et al.*, 2011). Resulta que este componente estructural representa la mayor proporción de los materiales lignocelulósicos y mediante TGA-DTG fue posible determinar su fracción en menor tiempo y con la mínima cantidad de sustancias químicas (Cuadro 2, Figuras 6b-9b). Además, por este método novedoso la degradación térmica por pirólisis de manera independiente de los tres componentes químicos principales de la madera (celulosa, hemicelulosas y lignina) es posible predecir con exactitud los parámetros de deconvolución del DTG y optimizar los resultados utilizando cálculos matemáticos como la regresión lineal múltiple y del uso del algoritmo (Díez *et al.*, 2020; Alvarado *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2022).

En particular para las hemicelulosas y sustancias extraíbles sólo se presentaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) entre métodos en la madera de *Acacia farnesiana*. Mientras que para lignina en las maderas de *Acacia farnesiana*, *A. penatula* y *Albizia plurijua*, no se encontraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$), lo que resulta comparable con informes publicados por Rego *et al.* (2019), quienes tampoco encontraron diferencias estadísticas entre

el análisis TGA y por el método tradicional de lignina Klason. Por otra parte, recientemente Sophonrat *et al.* (2024) reportan resultados de los contenidos de celulosas, hemicelulosas y lignina de las maderas de pino, abedul y roble obtenidos mediante TGA y la de convolución DTG son consistentes con los obtenidos por métodos tradicionales. Por otro lado, en diferentes tipos de biomasa como residuos agrícolas, maderas de coníferas y latifoliadas, mediante la deconvolución de las curvas del análisis termogravimétrico y con base a un modelo cinético de pseudocomponentes (PKM), encontraron buena concordancia ($\pm 7\%$) entre los datos experimentales de los procedimientos químicos y el método TGA-PKM.

En relación al análisis proximal también se cumplió con la hipótesis planteada encontrando consistencias entre métodos para la fracción de cenizas en las maderas de *A. plurijuga* y *P. laevisgata*. En particular para la materia volátil sólo presentó diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) entre métodos en la madera de *P. laevisgata* (Cuadro 2). Por otro lado, se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) para el carbono fijo, donde se encontró que debido a una diferencia en los cálculos en las ecuaciones matemáticas que se especifican en el cuadro 1, donde se expone que para los métodos químicos el porcentaje de carbono fijo se obtuvo en base a peso anhidro de las cenizas y materia volátil en comparación con el método térmico donde en la ecuación se resta la fracción de la humedad. Por lo tanto, resulta importante conocer el contenido de humedad en la biomasa para ambas metodologías, debido a la naturaleza higroscópica de la biomasa que en presencia de la humedad atmosférica puede variar incluso en un mismo día y a diferentes horas (Pintor-Ibarra *et al.*, 2023). Algunos autores han reportado que el uso de los diferentes estándares internacionales para cada método del análisis proximal (humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo) pueden diferir en variaciones en los resultados. Sin embargo, mediante TGA se pueden reducir los errores experimentales (Racero *et al.*, 2024). De acuerdo a Shrestha *et al.* (2024) mediante el análisis TGA-DTG es posible obtener resultados reproducibles de humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas de distintas biomásas. Por otra parte, ambas metodologías están limitadas para obtener sustancias extraíbles con el objetivo de evaluar los compuestos bioactivos de las plantas debido a que mediante el proceso térmico se degradan a bajas temperaturas y mediante el método tradicional se hidrolizan con los reactivos químicos.

Continuando con el análisis de resultados en función de las especies no se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) para la lignina entre ambos métodos para las maderas de *Acacia farnesiana*, *A. pennatula* y *Prosopis laevisgata*. En particular no se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) para las sustancias extraíbles mediante la metodología TGA-DTG para las cuatro especies de fabáceas (Cuadro 2). Estas diferencias estadísticas de las fracciones de los constituyentes químicos de la madera demuestran que la madera es un material químicamente heterogéneo ocasionado por factores como: variaciones entre y dentro de las especies (duramen, albura, corteza), condiciones climáticas, edad del árbol, altura sobre el nivel del mar, solventes químicos utilizados, metodologías, entre otros que influyen en las fracciones de sus constituyentes (Sjöström, 1981; Fengel y Wegener, 2011; Musule *et al.*, 2018).

Cuadro 2. Composición química y análisis proximal por métodos TGA-DTG y químico de las maderas de *Acacia farnesiana*, *A. pennatula*, *Albizia plurijuga* y *Prosopis laevigata*.

Método	<i>A. farnesiana</i>	<i>A. pennatula</i>	<i>A. plurijuga</i>	<i>P. laevigata</i>
Celulosa (%)				
TGA-DTG	57.49 ^{A,a} (±0.51)	54.20 ^{A,b} (±1.79)	58.73 ^{A,a} (±0.75)	46.09 ^{A,c} (±0.25)
Químico	58.03 ^{A,b} (±0.68)	54.96 ^{A,c} (±0.34)	60.1 ^{A,a} (±0.45)	48.29 ^{A,d} (±1.01)
Hemicelulosas (%)				
TGA-DTG	11.04 ^{B,a} (±0.22)	11.41 ^{A,a} (±0.54)	11.15 ^{A,a} (±0.11)	8.74 ^{A,b} (±0.23)
Químico	11.76 ^{A,a} (±0.28)	11.50 ^{A,ab} (±0.46)	10.81 ^{A,b} (±0.33)	7.37 ^{B,c} (±0.16)
Lignina (%)				
TGA-DTG	18.99 ^{A,b} (±0.02)	19.21 ^{A,b} (±1.50)	18.06 ^{A,b} (±1.06)	32.45 ^{A,a} (±0.40)
Químico	19.21 ^{A,b} (±0.38)	19.25 ^{A,b} (±0.65)	18.17 ^{A,b} (±0.81)	30.57 ^{B,a} (±0.75)
Extraíbles (%)				
TGA-DTG	12.46 ^{A,a} (±0.72)	15.16 ^{A,a} (±3.76)	12.05 ^{A,a} (±1.39)	12.72 ^{A,a} (±0.73)
Químico	10.79 ^{B,b} (±0.17)	13.97 ^{A,a} (±0.13)	10.73 ^{A,b} (±0.30)	13.53 ^{A,a} (±0.13)
Cenizas (%)				
TGA-DTG	2.30 ^{A,b} (±0.01)	2.91 ^{A,a} (±0.11)	1.42 ^{A,d} (±0.22)	1.90 ^{A,c} (±0.01)
Químico	1.80 ^{B,b} (±0.02)	2.58 ^{B,a} (±0.03)	1.09 ^{A,c} (±0.05)	1.78 ^{A,b} (±0.08)
Humedad (%)				
TGA-DTG	5.84 ^{A,a} (±0.17)	3.83 ^{A,b} (±0.92)	4.12 ^{A,b} (±0.33)	4.97 ^{A,ab} (±0.11)
Químico	5.35 ^{B,a} (±0.24)	4.37 ^{A,b} (±0.17)	4.51 ^{A,b} (±0.17)	2.03 ^{B,c} (±0.06)
Carbono fijo (%)				
TGA-DTG	13.50 ^{B,bc} (±0.53)	12.83 ^{B,c} (±0.14)	14.05 ^{B,b} (±0.13)	18.93 ^{B,a} (±0.08)
Químico	19.07 ^{A,b} (±0.09)	18.26 ^{A,b} (±0.83)	18.24 ^{A,b} (±0.25)	23.05 ^{A,a} (±0.37)
Materia volátil (%)				
TGA-DTG	78.34 ^{A,b} (±0.69)	80.41 ^{A,a} (±0.74)	80.51 ^{A,a} (±0.79)	74.15 ^{B,c} (±0.17)
Químico	79.12 ^{A,b} (±0.08)	79.16 ^{A,b} (±0.83)	80.67 ^{A,a} (±0.26)	75.17 ^{A,c} (±0.31)

Letras mayúsculas iguales en columna significa que no existe diferencia estadística entre método y letras minúsculas iguales en renglón significa que no existe diferencia estadística entre especies (Tukey, $p = 0.05$), para cada variable de respuesta: celulosa, hemicelulosas, lignina, extraíbles, cenizas, humedad, carbono fijo y materia volátil.

Con respecto a otros trabajos relacionados con la composición química básica por métodos químicos en las maderas de *Acacia farnesiana*, *A. pennatula*, *Albizia plurijuga* y *Prosopis laevigata* se reportan las siguientes proporciones por el método Van Soest: celulosa; 45.58 a 58.83%, hemicelulosas; 12.83 a 20.85%, lignina; 10.60 a 22.14%, extraíbles; 13.44 a 17.29% y cenizas; 1.07 a 2.89% (Martínez-Pérez *et al.*, 2015; Salazar-Herrera *et al.*, 2023), resultando comparables con los valores obtenidos en este trabajo. Para el análisis proximal por el método tradicional, otros estudios reportan los siguientes intervalos en las maderas de las cuatro fabáceas: materia volátil; 78.04 a 86.59% y carbono fijo; 12.32 a 19.83% (Apolinar-Hidalgo *et al.*, 2017; Ruiz-Aquino *et al.*, 2022; Salazar-Herrera *et al.*, 2023), resultando comparables con los encontrados en este trabajo (Cuadro 2) y en general los resultados obtenidos a partir del análisis proximal en este trabajo por ambos métodos se encuentran dentro de los rangos reportados para maderas de especies de latifoliadas; cenizas 0.49 a 4.51 %, materia volátil 76.60 a 94.70 % y carbono fijo 9.32 a 21.27 % (Rutiaga-Quñones *et al.*, 2020; Ruiz-Aquino *et al.*, 2022).

7.2. Proceso termogravimétrico

En las figuras 6a - 9a, se muestran en color negro las curvas de los análisis termogravimétricos de las cuatro maderas de fabáceas, donde se representa la pérdida de la masa en función de la temperatura y tiempo. Mediante este proceso fue posible obtener el análisis proximal (humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas). Adicionalmente, como guía para exponer el proceso de pirolisis se muestra también la rampa de calentamiento en las mismas figuras en color rojo en función de temperatura y tiempo. En primer lugar, en la zona de 0 a 80 min a 100 °C, ocurre la pérdida de agua en las muestras de las maderas, en general el porcentaje de pérdida de la masa corresponde a un 5%. Este fenómeno es consistente con otra investigación (Rani *et al.*, 2021). Por otra parte, también se ha reportado en la literatura que durante esta etapa se presenta la pérdida de una fracción de sustancias extraíbles (ceras, gomas, terpenos, taninos, polifenoles, carbohidratos, entre otros) que debido a su bajo peso molecular se descomponen a bajas temperaturas (Cichosz y Masek, 2020; Alonso-Montemayor *et al.*, 2020). Por otra parte, Moya *et al.* (2017) refieren que contenido de extraíbles afectan la tasa de degradación térmica de la celulosa y las hemicelulosas. Continuando con la descripción a la izquierda de estos gráficos en color azul se representan los picos del DTG correspondientes a la humedad de las maderas en el intervalo de 0 a 80 minutos.

Tras la deshidratación de la biomasa se produce la descomposición térmica de los constituyentes orgánicos de la madera: extraíbles, hemicelulosas, celulosa y lignina, este proceso inicio de acuerdo a las figuras 6a – 9a, en los intervalos de tiempo de 80 a 150 min. a temperaturas de 100°C hasta 700°C, en esta zona se obtuvo el carbono fijo. En esta segunda etapa ocurre la mayor pérdida de peso en las maderas de las cuatro fabáceas. Este fenómeno es comparable con algunos autores que han publicado que la velocidad máxima de descomposición de la madera en atmosfera de nitrógeno ocurre de 350 a 370 °C, donde existe la pérdida de peso de hasta el 80%, relacionada principalmente con la degradación de los carbohidratos; celulosa y hemicelulosas (Alonso-Montemayor *et al.*, 2020; Somorin *et al.*, 2020).

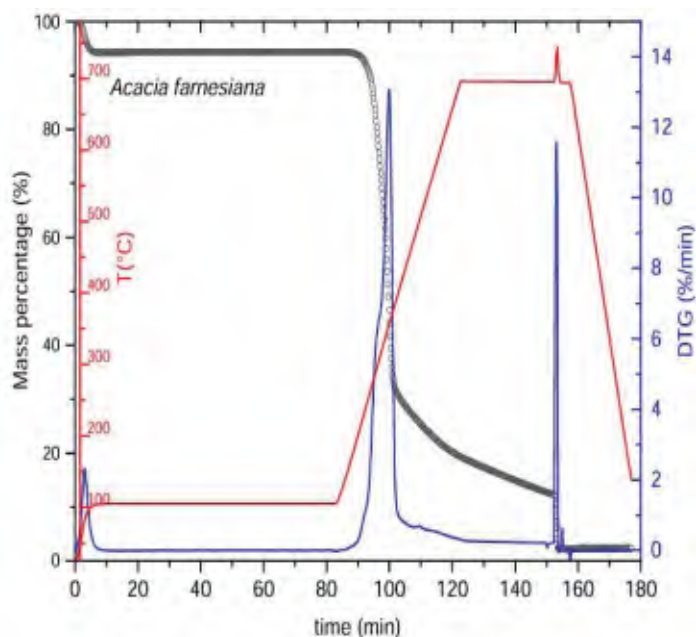


Figura 6a. Curvas TGA y DTG de la madera de *Acacia farnesiana*.

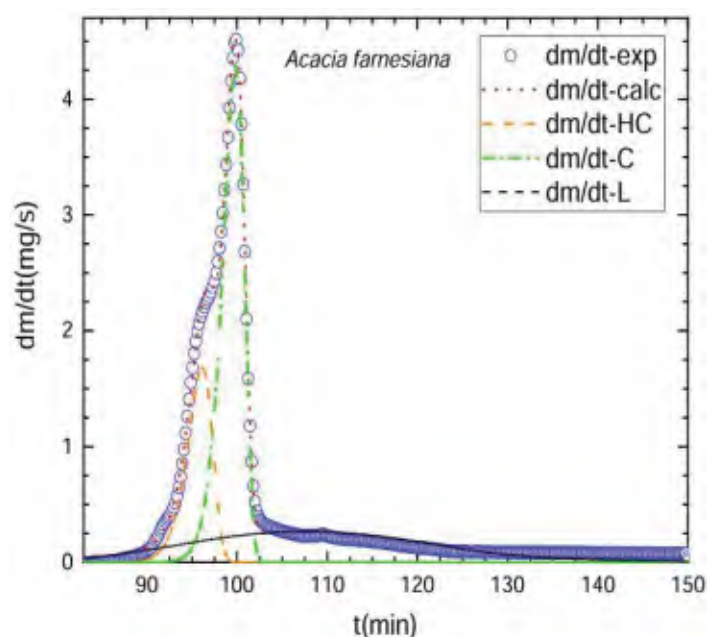


Figura 6b. Deconvolución de la curva DTG de la madera de *Acacia farnesiana*. Exp= gráficos experimentales, Calc= gráficos cálculos, HC = Hemicelulosas, C= celulosa y L = lignina.

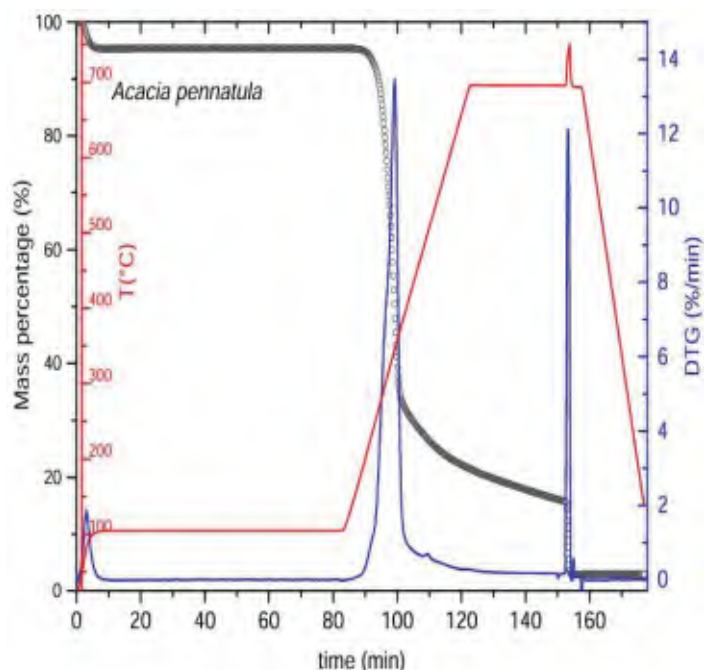


Figura 7a. Curvas TGA y DTG de la madera de *A. pennatula*.

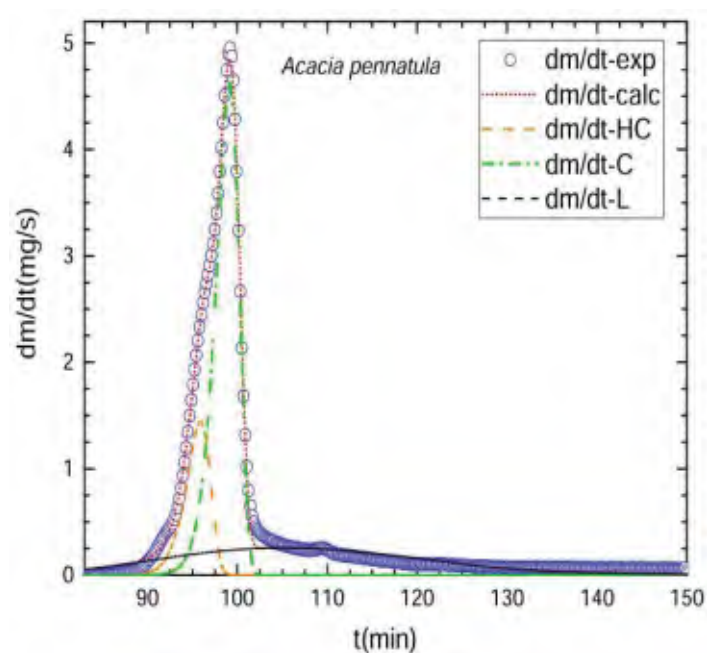


Figura 7b. Deconvolución de la curva DTG de la madera de *A. pennatula*. Exp= gráficos experimentales, Calc= gráficos cálculos, HC = Hemicelulosas, C= celulosa y L = lignina.

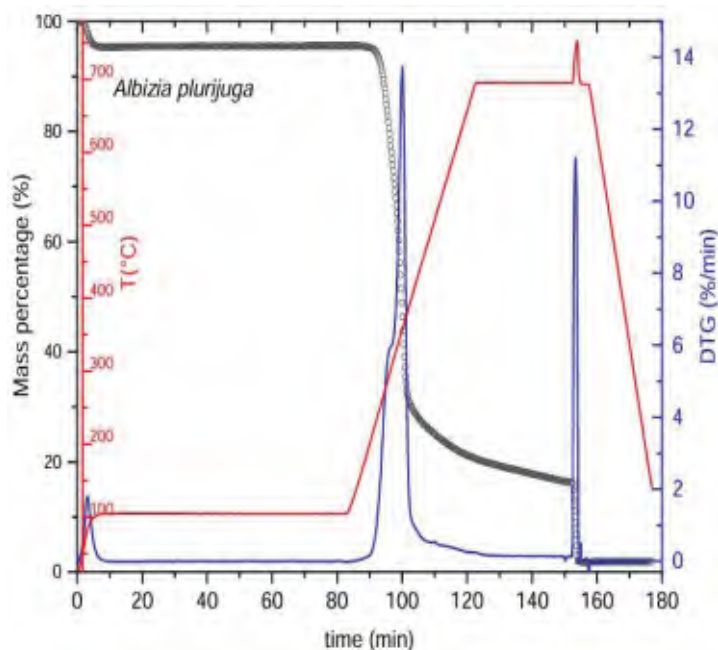


Figura 8a. Curvas TGA y DTG de la madera de *Albizia plurijuga*.

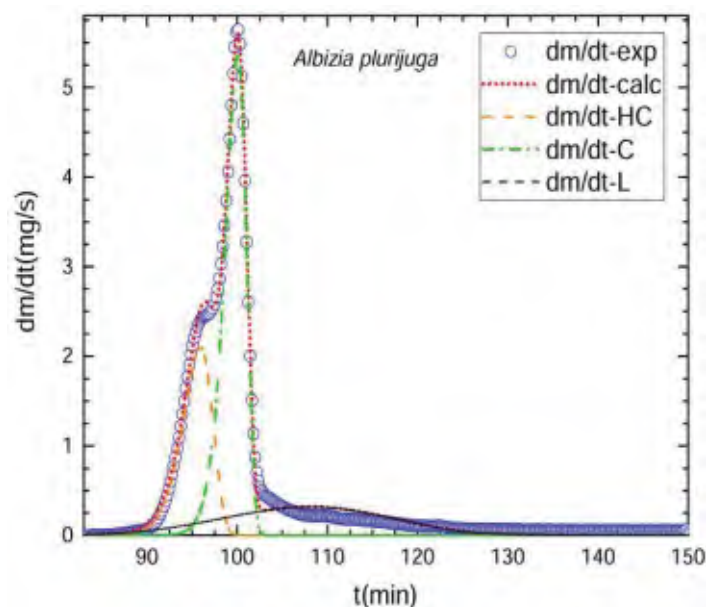


Figura 8b. Deconvolución de la curva DTG de la madera de *Albizia plurijuga*. Exp= gráficos experimentales, Calc= gráficos cálculos, HC = Hemicelulosas, C= celulosa y L = lignina.

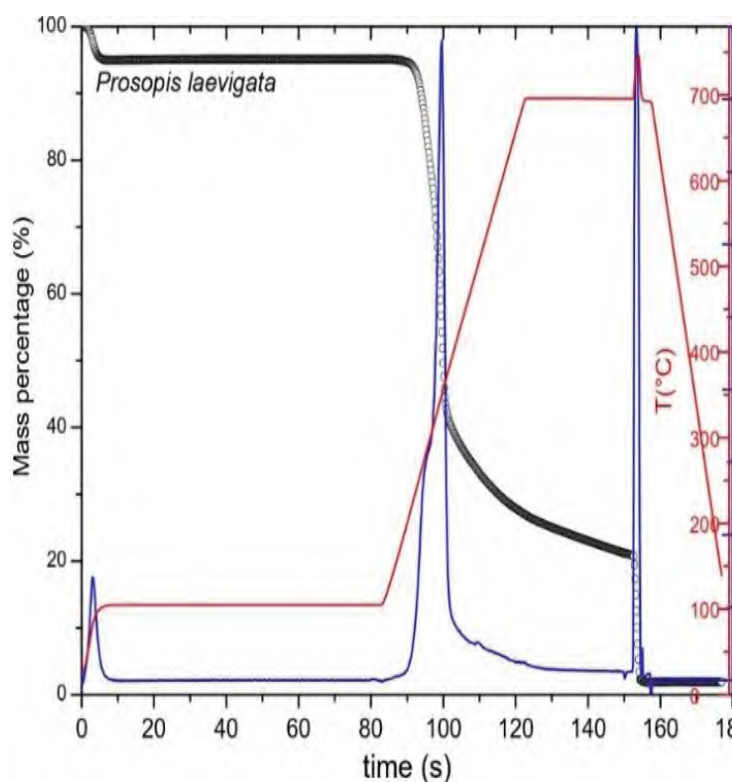


Figura 9a. Curvas TGA y DTG de la madera de *Prosopis laevigata*.

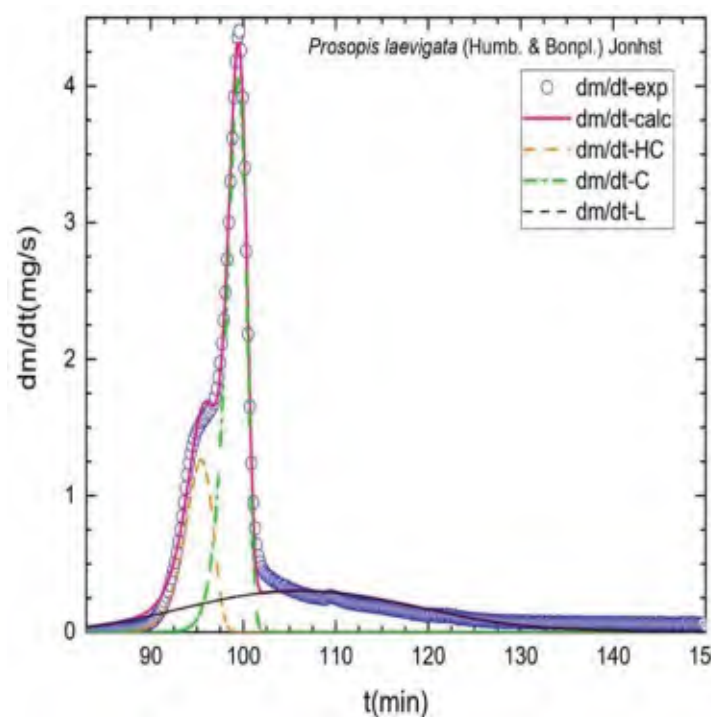


Figura 9b. Deconvolución de la curva DTG de la madera de *Prosopis laevigata*. Exp= gráficos experimentales, Calc= gráficos cálculos, HC = Hemicelulosas, C= celulosa y L = lignina

En las figuras 6a – 9a destacan las señales centrales de mayor proporción en color azul, es importante mencionar que esta señal proporciona información valiosa sobre los cambios clave de la biomasa como las temperaturas de reacción y velocidades de descomposición en un tiempo dado, a partir de aquí se deriva el proceso de deconvolución de las figuras 6b-9b. Finalmente a la derecha de las gráficas 6a – 9a, se aprecia una señal más estrecha que expresa la combustión de la materia orgánica remanente al aplicar oxígeno en el proceso de pirolisis, tras el enfriamiento el residuo corresponde a las cenizas. De acuerdo a los resultados obtenidos mediante el proceso termogravimétrico de las 4 maderas de fabáceas fue posible obtener los resultados del análisis proximal en un tiempo de 160 minutos. Sin embargo, en otros estudios del análisis proximal de distintas biomásas se ha encontrado que el análisis proximal puede reducirse de 4 H usando el método estándar a un tiempo de 10 a 20 minutos usando TGA, con diferentes rampas de temperatura, tipos de atmósferas y flujos, obteniendo resultados consistentes (Velázquez-Martí *et al.*, 2018). Por otra parte, García *et al.* (2013) propone una metodología en base a TGA para obtener el análisis proximal de muestras de biomasa en un tiempo de 25 minutos, con errores experimentales medios <6% para humedad y materia volátil, 10 % para carbono fijo. Sin embargo, en nuestro trabajo fue posible obtener resultados del análisis proximal y composición química básica en un tiempo de 160 minutos.

7.3. Deconvolución de las curvas DTG

El comportamiento de las curvas DTG para las maderas de las cuatro fabáceas se pueden consultar en las figuras 6b-9b. Resultó en general que estas gráficas muestran un comportamiento similar en cuanto su deformación, altura y velocidad de reacción entre las cuatro muestras de este estudio. Sin embargo, si se hace un análisis más estricto podemos observar que la deformación de los gráficos calculados y experimentales de las figuras 8b y 9b a los 95 minutos muestran una deformación más abrupta para las maderas de *Albizia plurijuga* y *Prosopis laevigata*. Mientras que la señal de celulosa en color verde para la madera de *Albizia plurijuga* resultó más pronunciada (Figura 8b) en comparación con las otras tres fabáceas, cabe resaltar que a partir de la madera de esta especie se obtuvo la mayor fracción de celulosa 58.73 % (Cuadro 2). Con respecto a la señal en color negro correspondientes a la lignina fue muy similar para las cuatro fabáceas en cuanto a la deformación y velocidad de reacción. En contraste con otros estudios que han utilizado este método para biomásas acuáticas, agrícolas y forestales, como cortezas y maderas de coníferas, se obtienen picos con diferentes dimensiones que se atribuyen a la variación de las fracciones de sus constituyentes primarios, en las figuras 10 -13 se pueden observar las diferencias de las deformaciones de las señales y velocidades de reacción (Musule *et al.*, 2018; Diez *et al.*, 2020; Alvarado-Flores *et al.*, 2022).

En la literatura se ha documentado que la celulosa por ser un polímero lineal con unidades de glucosa abundantes requiere mayor energía de activación y velocidad de reacción presentando curvas más pronunciadas. Por otro lado, las hemicelulosas requieren menor energía de activación a temperaturas bajas principalmente atribuidas a su estructura amorfa. La lignina por ser contener distintos grupos funcionales en su estructura requiere de una energía de activación menor a la de los carbohidratos. Sin embargo, su velocidad de reacción es más baja y persiste en un amplio rango de temperaturas presentando áreas bajo las curvas más amplias (Skreiberg

et al., 2011; Chen et al., 2019; Díez et al., 2020), en los siguientes párrafos se exponen las propiedades térmicas de los constituyentes primarios de la madera.

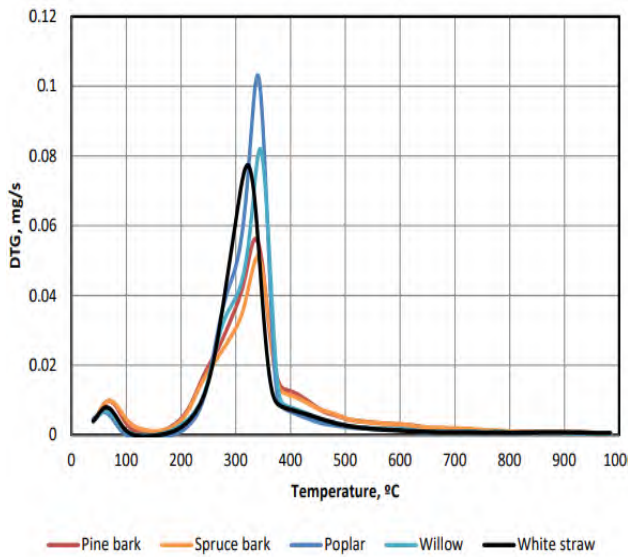


Figura 10. Comparación de curvas DTG de distintas biomásas (Díez et al., 2020).

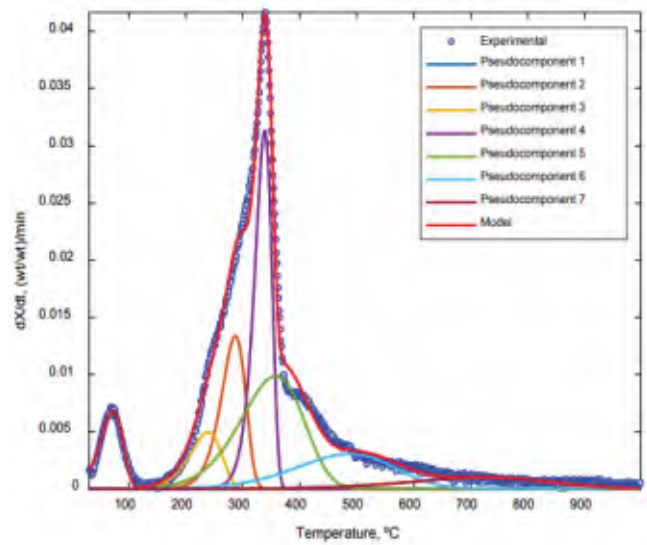


Figura 11. Deconvolución de la curva DTG de corteza de pino (Díez et al., 2020).

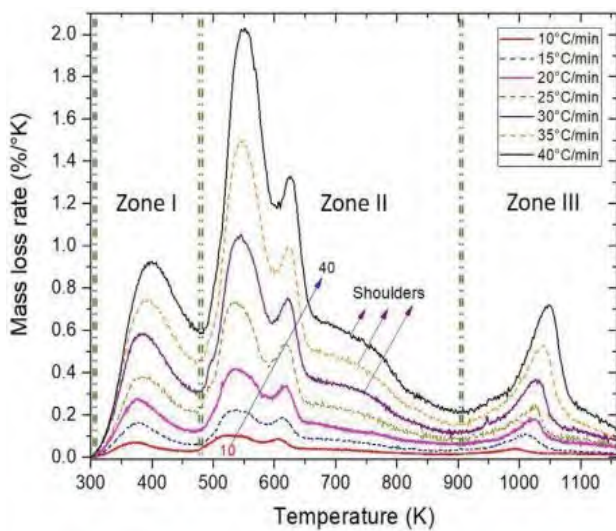


Figura 12. Curvas DTG de *Sargassum* spp, a diferentes velocidades de calentamiento (Alvarado-Flores et al., 2022).

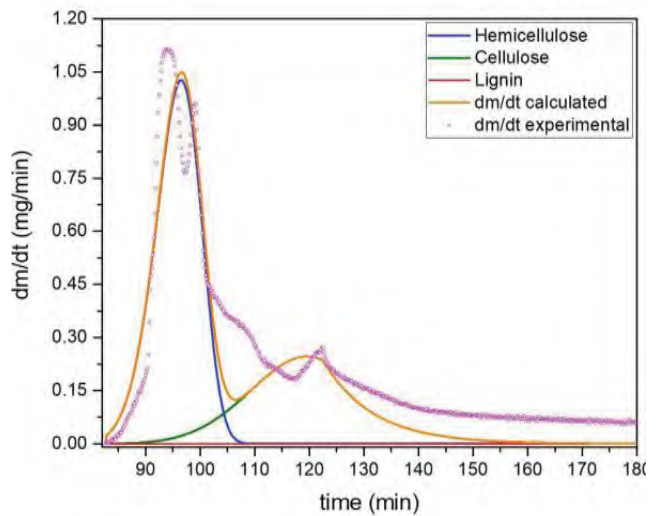


Figura 13. Deconvolución de la curva DTG de *Sargassum* spp (Alvarado-Flores et al., 2022).

La degradación térmica independiente por termogravimetría de los tres componentes primarios de la madera: celulosa, hemicelulosas y lignina, pueden predecir con precisión los parámetros de deconvolución del DTG. Además, es muy confiable utilizar la termogravimetría y su derivada (DTG) en base a la pérdida de peso en función del tiempo, debido a que esta señal es mucho más sensible a pequeños cambios (Díez et al., 2020, Kim et al., 2022). Por otra parte, los análisis termogravimétricos ofrecen una gran precisión y repetibilidad (Escalante et al., 2022).

Primeramente, toca mencionar a las hemicelulosas que son moléculas más cortas en comparación con la celulosa y en algunos casos presentan ramificaciones, se encuentran en estrecha asociación con la celulosa, los principales azúcares que las conforman son cinco; glucosa, manosa, galactosa, xilosa y arabinosa (Sjöström, 1981). Mediante la deconvolución de la de derivada de TGA de las maderas de las cuatro fabáceas en las figuras 6b-9b se encuentran en color naranja entre 90 a 100 min. Gracias a estudios previos es conocido que las hemicelulosas son polímeros no cristalinos, pueden hidrolizarse fácilmente y su degradación térmica ocurre entre 200 a 300 °C (Zhou *et al.*, 2017; Nurazzi *et al.*, 2021; Alvarado-Flores *et al.*, 2024).

En segundo lugar, el polímero estructural más abundante en la madera que corresponde a la celulosa, encontrándose aproximadamente en 50 % tanto en latifoliadas como en coníferas, se caracteriza por ser un polímero lineal de alto peso molecular formado exclusivamente por unidades de β -D-glucosa (Fengel y Wegener, 2011), este pico de color verde se presenta en las figuras 6b-9b. En la literatura se han reportado las siguientes propiedades térmicas de la celulosa; contiene regiones cristalinas que contribuyen a su rigidez y estabilidad térmica, los grupos hidroxilo libres presentes en su molécula provocan enlaces de hidrógeno intramoleculares e intermoleculares, que fomentan la formación de varios arreglos moleculares ordenados, su degradación térmica ocurre entre 240 a 400 °C (Poletto *et al.*, 2014; Rego *et al.*, 2019; Cichosz y Masek, 2020; Escalante *et al.*, 2022).

La lignina es el tercer componente macromolecular de la madera y consiste en un sistema aromático formado por unidades de fenilpropano (Fengel y Wegener 2011; Chávez-Sifontes y Domine, 2013). La lignina se descompone en una zona de temperaturas más amplio en comparación a los polímeros de carbohidratos en las figuras 6b - 9b se observa la señal en color negro con un amplio tiempo de reacción desde los 80 a 150 min. También se encontró una alta estabilidad térmica en las cuatro maderas de fabáceas en este trabajo, en otros estudios se ha explicado que este comportamiento es causado por el alto peso molecular y la mayor estabilidad térmica lo que la hace muy difícil de descomponer, su degradación térmica ocurre desde los 200 a 520 °C (Brebú y Vasile, 2010; Nurazzi *et al.*, 2021 Escalante *et al.*, 2022, Alvarado-flores *et al.*, 2024).

En las figuras 6b – 9b también se observa la expresión dm/dt -exp en color azul que se refiere al termograma obtenido experimentalmente utilizando el equipo y la expresión dm/dt -cal en color rosa que hace referencia al termograma calculado utilizando el algoritmo propuesto. Esto demuestra la similitud entre los datos experimentales y los evaluados por el método de TGA usando la deconvolución de las derivadas DTG para las cuatro maderas de fabáceas. Por otra parte, en el cuadro 1 se encuentra la comparativa entre los métodos TGA-DTG y químico donde resulta relevante que medite el método termogravimétrico fue posible obtener resultados del análisis proximal y constitución primaria en menor tiempo (160 minutos), menor costo y con la mínima cantidad de reactivos químicos. Además, por esta vía también es posible obtener otros resultados como análisis cinéticos y termodinámicos. En relación al análisis químico resultó significativamente con una mayor diferencia de tiempo (76 horas) principalmente en las etapas de lavado y deshidratado. Adicionalmente, este método demandando un mayor número de

reactivos químicos y sólo fue posible determinar la constitución primaria. Asimismo, el análisis proximal fue determinado por separado con base en normas estándar y cálculos gravimétricos.

7.4. Poder calorífico superior

El poder calorífico es un indicador importante de la biomasa para su uso como biocombustible, el poder calorífico superior utiliza la energía que libera el vapor de agua cuando se condensa mientras que el poder calorífico inferior no considera esta energía (Carrillo-Parra *et al.*, 2016). En el cuadro 3, se muestran los valores del poder calorífico de las cuatro maderas de fabáceas usando la bomba calorimétrica y modelos matemáticos. Resultó que usando la bomba calorimétrica y en función de la ecuación de cálculo en base la composición química y el análisis proximal para las maderas de *Albizia plurijuga* y *Prosopis laevigata* (Cuadro 3) no se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). Por otro lado, los resultados del cálculo del poder calorífico en función de la composición química y el análisis proximal de las maderas de *Acacia farnesiana* y *A. pennatula*, tampoco presentaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). Es importante mencionar que utilizando los cálculos en función del análisis elemental se obtuvieron valores inferiores para las cuatro especies de fabáceas y presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) entre métodos, lo que resulta consistente con resultados previos utilizando los mismos modelos de predicción en distintas fuentes de biomásas (Rutiaga-Quñones *et al.*, 2020).

Por otra parte, con respecto a las especies no se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) para el cálculo del poder calorífico en base al análisis elemental para las cuatro fabáceas. Con respecto a esta misma comparación en renglón del cuadro 3, el poder calorífico en base a la bomba calorimétrica sólo la madera de *Albizia plurijuga* presentó diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$). De acuerdo a los resultados obtenidos, si no se tiene acceso a la bomba calorimétrica, el modelo recomendado para calcular el poder calorífico es en función del análisis proximal, debido a que se puede calcular con resultados inmediatos que no requieren mucho tiempo y no requiere el uso de reactivos químicos, lo anterior, es consistente con reportes por Rodríguez-Romero *et al.* (2022).

En general, los resultados del poder calorífico superior de las cuatro maderas de fabáceas usando la bomba calorimétrica y el modelo matemático con base en el análisis proximal y composición química (Cuadro 3) se encuentran dentro del intervalo 19.17 a 20.53 MJ/kg obtenidos en reportes previos usando bomba calorimétrica para maderas de distintas especies de fabáceas (Jiménez-Mendoza *et al.*, 2023; Salazar-Herrera *et al.*, 2023). También resultó que el poder calorífico obtenido con la bomba calorimétrica de la madera de *A. pennatula* se encuentra dentro del intervalo 18.4 a 19.2 MJ/kg reportado para maderas de latifoliadas de acuerdo al estándar UNE-EN ISO 17225-1 (2020) y los resultados del poder calorífico de las maderas de *Acacia farnesiana*, *Albizia plurijuga* y *Prosopis laevigata* son mayores a este parámetro de calidad anteriormente consultado.

Cuadro 3. Análisis y cálculo del poder calorífico superior de las maderas de *Acacia farnesiana*, *A. pennatula*, *Albizia plurijuga* y *Prosopis laevigata*.

Poder calorífico (MJ/kg)	<i>A. farnesiana</i>	<i>A. pennatula</i>	<i>A. plurijuga</i>	<i>P. laevigata</i>
Bomba calorimétrica	19.41 ^{B,a} (±0.43)	18.49 ^{B,b} (±0.25)	19.61 ^{A,a} (±0.28)	20.16 ^{A,a} (±0.26)
Composición química	20.04 ^{A,c} (±0.04)	20.25 ^{A,b} (±0.05)	19.96 ^{A,c} (±0.05)	21.07 ^{A,a} (±0.06)
Análisis proximal	20.27 ^{A,b} (±0.02)	19.99 ^{A,c} (±0.16)	20.24 ^{A,b} (±0.05)	21.01 ^{A,a} (±0.08)
Análisis elemental	18.00 ^{C,a} (±0.08)	16.87 ^{C,a} (±0.39)	17.75 ^{B,a} (±0.82)	18.24 ^{B,a} (±0.92)

Letras mayúsculas iguales en columna significa que no existe diferencia estadística y letras minúsculas iguales en reglón significa que no existe diferencia estadística (Tukey, $p = 0.05$).

7.5. Análisis elemental orgánico e inorgánico

7.5.1. Análisis elemental

El análisis elemental permite conocer aspectos de calidad en los biocombustibles sólidos como la fracción de C, H y O (Palamanit *et al.*, 2019). Algunos aspectos de la calidad de los biocombustibles que se han registrado en la literatura son: el alto porcentaje de C y O en las biomásas favorecen el poder calorífico (García *et al.*, 2012; Palamanit *et al.*, 2019), a reserva que según Ali *et al.* (2021) refieren que materiales lignocelulósicos con alto contenido de O pueden provocar corrosión en los equipos de combustión. Con respecto al H se ha definido que contribuye de forma positiva al poder calorífico, sin embargo, en la biomasa se encuentra menor proporción en contraste con el C (García *et al.*, 2012). Por otro lado, se ha informado que altas concentraciones de N contribuyen a generar de óxidos de nitrógeno (NO_x) y el S incentiva la formación dióxido de azufre (SO₂). Además, es bien conocido que estos elementos son los responsables, del impacto ambiental, daños a la salud humana y perjudican los equipos de combustión (ISO 16948, 2015; ISO 16994, 2016; Endriss *et al.*, 2023). Sin embargo, el bajo porcentaje de N presentes en las maderas de las cuatro fabáceas en este trabajo (Cuadro 4) pueden tener bajos impactos negativos al ser utilizadas como biocombustibles sólidos, debido a que se encuentran por debajo de los parámetros técnicos límite ($N \leq 0.5$). Con respecto al S los resultados valorados en este trabajo se encuentran ligeramente por encima (<0.03) de acuerdo al estándar UNE-EN 14961-1 (2011). Los resultados encontrados en esta investigación son comparables con otros estudios realizados en maderas de especies de fabáceas: C (45.9 a 49.5 %), H (6.7 a 7.3 %), O (43.2 a 46.7 %), N (0.11 a 0.41 %) y S (0.04 a 0.14 %) según Salazar-Herrera *et al.* (2023).

Cuadro 4. Elementos orgánicos e inorgánicos en las maderas de *Acacia farnesiana*, *A. pennatula*, *Albizia plurijuga* y *Prosopis laevigata*.

Elemento	<i>A. farnesiana</i>	<i>A. pennatula</i>	<i>A. plurijuga</i>	<i>P. laevigata</i>
Análisis elemental (%)				
C	46.65 (±0.21)	43.76 (±0.18)	45.78 (±1.0)	46.4 (±0.42)
H	6.70 (±0.14)	6.89 (±0.29)	6.95 (±0.34)	6.79 (±0.15)
O	46.06 (±0.24)	48.95 (±0.32)	46.97 (±1.20)	46.43 (±0.38)
N	0.42 (±0.14)	0.31 (±0.14)	0.21 (±0.09)	0.3 (±0.12)
S	0.11 (±0.02)	0.07 (±0.006)	0.06 (±0.007)	0.05 (±0.01)
Microanálisis de cenizas (ppm)				
K	105019.30	150391.90	150536.02	182962.57
Ca	102885.96	73275.93	101960.59	122616.47
P	9238.77	6424.63	4400.24	649.19
Sr	3069.60	2362.51	3245.48	3174.39
Na	2449.93	1390.54	8202.02	11042.69
Mg	1140.72	578.96	1436.26	972.01
S	2017.05	836.61	966.02	1265.70
Ba	280.89	160.12	105.75	106.76
Li	122.19	63.18	155.30	32.40
Fe	112.84	103.61	195.65	53.47
B	86.40	43.02	240.56	84.35
Si	52.48	25.80	158.15	69.56
Al	41.47	28.79	72.82	35.98
Cu	41.71	26.58	41.57	44.28
Mn	24.82	19.41	20.91	23.72
Zn	15.13	13.31	14.34	16.37
Ni	1.05	5.47	< 0.05	7.70
Cr	<0.05	0.54	< 0.05	4.48

7.5.2. Microanálisis de las cenizas

En el cuadro 4 se presentan los 18 elementos inorgánicos identificados en las cenizas de las maderas de las cuatro fabáceas, los elementos más abundantes son: K, Ca, P, Sr, Na y Mg, con respecto a otras especies de fabáceas y otras especies de latifoliadas colectadas en la misma zona de estudio resulta que las cenizas de sus maderas también son ricas en estos *elementos* (Salazar-Herrera *et al.*, 2023; Alvarado-Flores *et al.*, 2024; Hernández-Méndez *et al.*, 2026). De acuerdo al estándar internacional de biocombustibles sólidos se estiman los siguientes valores límites para maderas de latifoliadas según UNE-EN ISO 17225-1 (2020): K (1500 a 500 ppm), Ca (20000 a 800), P (200 a 50 ppm) y Mg (400 a 100 ppm), donde los resultados encontrados en este trabajo son mayores a los valores de los estándares consultados. En este sentido, es bien conocido que la constitución de los minerales de las cenizas puede variar por factores como la disponibilidad de minerales del suelo donde se desarrolla el árbol (Fengel y Wegener, 2011; Pintor-Ibarra *et al.*, 2017).

Los elementos inorgánicos identificados en las cenizas pueden tener efectos positivos o negativos de acuerdo a la literatura consultada: en primer lugar los elementos que pueden favorecer con fines bioenergéticos son: Ca, Mg, P, benefician el punto de fusión de las cenizas, retienen los contaminantes y disminuyen los residuos en la maquinaria de combustión (Obernberger y Thek, 2010; ISO 16967, 2015), en segundo lugar los elementos también ocasionan efectos negativos en los procesos de combustión por ejemplo: Ca, Mg, P, K, Na y S, pueden causar emisión de partículas, escorias y corrosión. Por otro lado, el Na, Fe, y Si, pueden causar problemas en la fusión de la cenizas e incrustaciones (Obernberger y Thek, 2010; ISO 16967, 2015; ISO 16994; 2016). En las maderas caracterizadas en este trabajo se encontró que la presencia de Zn para las cuatro fabáceas resultando ligeramente superior al parámetro técnico ≤ 10.0 ppm para biocombustibles sólidos (Cuadro 4), en contraste la proporción de Ni y Cr se encuentran por debajo ≤ 10.0 ppm de la recomendación técnica (UNE-EN 14961-1, 2011).

8. CONCLUSIONES

Mediante el análisis termogravimétrico TGA-DTG fue posible determinar la constitución primaria y el análisis proximal de las maderas de las cuatro especies de fabáceas, procediendo en la contribución de metodologías para obtener resultados a menor costo, con exactitud, en menor tiempo y con la mínima cantidad de reactivos químicos. Trascendió que la hipótesis planteada en este trabajo es consistente con los resultados de celulosa para las maderas de las cuatro fabáceas, considerado que la celulosa es el principal constituyente químico de la biomasa. Igualmente, las hemicelulosas y lignina en las maderas *Acacia pennatula* y *Albizia plurijuga*. En particular, sólo se encontraron diferencias estadísticas para la madera de *A. farnesiana* en las sustancias extraíbles.

En relación al análisis proximal también se cumplió con la hipótesis planteada encontrando consistencias entre métodos para la fracción de cenizas en las maderas de *Albizia plurijuga* y *Prosopis laevigata*. Asimismo, para la materia volátil en las maderas de *Acacia farnesiana*, *A. pennatula* y *Albizia plurijuga*.

Con respecto al poder calorífico superior, resultó que usando la bomba calorimétrica y usando los cálculos con base la composición química y el análisis proximal para las maderas de *Albizia plurijuga* y *Prosopis laevigata* no se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). Importantemente, el poder calorífico de las maderas de *Acacia farnesiana*, *Albizia plurijuga* y *Prosopis laevigata* son mayores al parámetro de calidad internacional. Como resultado de esta comparación, si no se tienen acceso al equipo calorímetro, el modelo recomendado para calcular el poder calorífico es en función del análisis proximal, debido a que se puede calcular con resultados inmediatos que no requieren mucho tiempo, inversión de quipos costosos y no requiere el uso de reactivos químicos.

En cuanto con el análisis elemental orgánico de las maderas de cuatro especies de fabáceas la concentración de nitrógeno se encuentra por debajo de los parámetros técnicos límite de nitrógeno (≤ 0.5) para su comercialización como biocombustibles sólidos. Se identificaron 18 elementos inorgánicos en las cenizas y los más abundantes fueron; K, Ca, P, Sr, Na y Mg.

9. BIBLIOGRAFÍA

Agu, O. S., Tabil, L. G., Mupondwa, E., Emadi, B., Cree, D. (2025). Pelletization and quality evaluation of torrefied selected biomass with microwave absorber. *Results in Engineering*, 104183. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104183>

Apolinar-Hidalgo, F., Honorato-Salazar, J. A., Colotl-Hernández, G. (2017). Caracterización energética de la madera de *Acacia pennatula* Schltdl. & Cham. y *Trema micrantha* (L.) Blume. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 8(39), 71-82. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i39.44>

Ali, L., Ahmed Baloch, K., Palamanit, A., Raza, S. A., Laohaprapanon, S., Techato, K. (2021). Physicochemical characterisation and the prospects of biofuel production from rubberwood sawdust and sewage sludge. *Sustainability*, 13(11), 5942. <https://doi.org/10.3390/su13115942>

Alvarado Flores, J.J., Alcaraz Vera, J.V., Ávalos Rodríguez, M.L., Rutiaga Quiñones, J.G., Valencia Espino, J., Guevara Martínez, S.J., Ríos, E.T., Zarraga Aguado, R. (2022). Kinetic, thermodynamic, FT-IR, and primary constitution analysis of *Sargassum* spp. from Mexico: Potential for hydrogen generation. *Int. J. Hydrogen Energy*, 47, 30107-30127. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.05.051>

Alvarado Flores, J. J., Pintor Ibarra, L. F., Mendez Zetina, F. D., Rutiaga Quiñones, J. G., Alcaraz Vera, J. V., Ávalos Rodríguez, M. L. (2024). Pyrolysis and Physicochemical, Thermokinetic and Thermodynamic Analyses of *Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britt and Baker Waste to Evaluate Its Bioenergy Potential. *Molecules*, 29(18), 4388. <https://doi.org/10.3390/molecules29184388>

Alonso-Montemayor, F. J., López-Badillo, C. M., Aguilar-González, C. N., Ávalos-Belmontes, F., Castañeda-Facio, A. O., Reyna-Martínez, R., Neira-Velázquez, M.G., Soria-Argüello, G., Navarro-Rodríguez, D., Delgado-Aguilar, M., Narro-Céspedes, R. I. (2020). Effect of cold air plasmas on the morphology and thermal stability of bleached hemp fibers. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(Sup. 1), 457-467. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Mat1510>

Amutio, M., Lopez, G., Aguado, R., Artetxe, M., Bilbao, J., Olazar, M. (2012). Kinetic study of lignocellulosic biomass oxidative pyrolysis. *Fuel*, 95, 305-311. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.008>

Aniza, R., Chen, W. H., Kwon, E. E., Bach, Q. V., Hoang, A. T. (2024). Lignocellulosic biofuel properties and reactivity analyzed by thermogravimetric analysis (TGA) toward zero carbon scheme: A critical review. *Energy Conversion and Management: X*, 22, 100538. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100538>

Aniza, R., Petrissans, A., Petrissans, M. (2026). Polymers and Chemical Composition of Hardwood and Softwood (Bark, Sapwood, and Heartwood) for Biofuel Production: A Comprehensive Review. *Polymers*, 18(11), 1340. <https://doi.org/10.3390/polym18111340>

Arcibar-Orozco, J. A., Josue, D. B., Ríos Hurtado, J. C., Rangel Méndez, J. R. (2014). Influence of iron content, surface area and charge distribution in the arsenicremoval by activated carbons. *Chem. Eng. J.* 249, 201-209. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.096>

ASTM E872 – 82 (2013). Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. ASTM International, West Conshohocken, PA. USA.

ASTM D1102-84 (2013). Standard Test Method For Ash in Wood. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM D5142 (2017). Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures. West Conshohocken, PA, USA.

ASTM E11-20 (2020). Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves. ASTM International, West Conshohocken, PA. USA.

ASTM D4442-20 (2020). Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA. USA.

Brebu, M., Vasile, C. (2010). Thermal degradation of lignin—a review. *Cellulose Chemistry & Technology*, 44(9), 353.

Bui, H. H., Tran, K. Q., Chen, W. H. (2016). Pyrolysis of microalgae residues—a kinetic study. *Bioresource Technology*, 199, 362-366. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.069>

Bustamante García, V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruíz, J. Á., Corral-Rivas, J. J., Hernández Díaz, J. C. (2016). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(38), 5-23.

Carrier, M., Loppinet-Serani, A., Denux, D., Lasnier, J. M., Ham-Pichavant, F., Cansell, F., Aymonier, C. (2011). Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass. *Biomass and bioenergy*, 35(1), 298-307. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.067>

Carrillo, A., Mayer, I., Koch, G., Hapla, F. (2008). Wood anatomical characteristics and chemical composition of *Prosopis laevigata* grown in the Northeast of Mexico. *IAWA Journal* 29(1); 25-34. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000167>

Carrillo-Parra, A., Bustamante-García, V., Ngangyo-Heya, M., Corral-Rivas, J.J. (2016). Capítulo 1. Contenido de humedad y calidad de biocombustibles sólidos. In: *Química de los materiales lignocelulósicos y su potencial bioenergético*; Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Morelia, México. pp. 12–28.

Castillo-Tera, O. A., López-Sosa, L. B., Pintor-Ibarra, L. F., Rutiaga-Quiñones, J. G., Morales-Máximo, M. (2025). Evaluation of *Bursera cuneata* Schltdl. wood residues for use as densified biofuels. *Results in Engineering*, 104916. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104916>

Chávez-Sifontes, M., Domine, M. E. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en ciencias e Ingeniería*, 4(4), 15-46.

Chávez-Rosales, J. S., Pintor-Ibarra, L. F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Ruiz-Aquino, F., Luján-Álvarez, C., Rutiaga-Quinones, J. G. (2021). Basic Chemical Composition of *Pinus* spp. Sawdust from Five Regions of Mexico, for Bioenergetic Purposes. *BioResources* 16(1) 816-824. <https://doi.org/10.15376/biores.16.1.816-824>

Chen, W. H., Wang, C. W., Ong, H. C., Show, P. L., Hsieh, T. H. (2019). Torrefaction, pyrolysis and two-stage thermodegradation of hemicellulose, cellulose and lignin. *Fuel*, 258, 116168. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116168>

Cichosz, S., Masek, A. (2020). Thermal Behavior of Green Cellulose-Filled Thermoplastic Elastomer Polymer Blends. *Molecules*, 25 (6), 1279. <https://doi.org/10.3390/molecules25061279>

CONABIO. (2020). Biodiversidad mexicana. Recuperado el 21 de abril, 2022, disponible en: www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/maderable.

Cordero, T., Márquez, F., Rodríguez-Mirasol, J., Rodríguez, J.J. (2001). Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. *Fuel*, 80, 1567-1571. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00034-5](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00034-5)

Cozzani, V., Lucchesi, A., Stoppato, G., Maschio, G. (1997). A new method to determine the composition of biomass by thermogravimetric analysis. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 75(1), 127-133. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450750120>

Cruz-Montelongo, C. D. L., Herrera-Gamboa, J., Ortiz-Sánchez, I. A., Ríos-Saucedo, J. C., Rosales-Serna, R. y Carrillo-Parra, A. (2020). Caracterización energética del carbón vegetal producido en el Norte-Centro de México. *Madera y Bosques*, 26(2), e2621971. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2621971>

Demirbaş, A. (1997). Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuel*, 76, 431-434. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(97\)85520-2](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(97)85520-2)

Díez, D., Urueña, A., Piñero, R., Barrio, A., Tamminen, T. (2020). Determination of hemicellulose, cellulose, and lignin content in different types of biomasses by thermogravimetric analysis and pseudocomponent kinetic model (TGA-PKM method). *Processes*, 8(9), 1048. <https://doi.org/10.3390/pr8091048>

Endriss, F., Kuptz, D., Hartmann, H., Brauer, S., Kirchhof, R., Kappler, A., Thorwarth, H. (2023). Analytical Methods for the Rapid Determination of Solid Biofuel Quality. *Chemie Ingenieur Technik*, 95: 1503-1525. <https://doi.org/10.1002/cite.202200214>

Escalante, J., Chen, W. H., Tabatabaei, M., Hoang, A. T., Kwon, E. E., Lin, K. Y. A., Saravanakumar, A. (2022). Pyrolysis of lignocellulosic, algal, plastic, and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of thermogravimetric analysis (TGA) approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112914. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112914>

Espinosa-Negrín, A. M., López-González, L. M., Casdelo-Gutiérrez, N. L. (2022). Pretratamientos aplicados a biomásas lignocelulósicas: una revisión de los principales métodos analíticos utilizados para su evaluación. *Revista Cubana de Química*, 34(1), 87-110.

Fengel, D., Wegener, G. (2011). *Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions*; Walter de Gruyter: Berlin, Germany, pp. 66–222.

García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., Bueno, J. L. (2012). Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource technology*, 103(1), 249-258. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.004>

García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., Bueno, J. L. (2013). Biomass proximate analysis using thermogravimetry. *Bioresource technology*, 139, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.197>

Ghetti, P., Ricca, L., Angelini, L. (1996). Thermal analysis of biomass and corresponding pyrolysis products. *Fuel*, 75, 565-573. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.004>

Gutiérrez-Acosta, J. M., Orihuela-Equihua, R., Pintor-Ibarra, L. F., González-Ortega, N., Hernández-Solís, J. J., Ruíz-Aquino, F., Navarrete-García, M. A., Rutiaga-Quñones, J. G. (2021). On the basic chemical composition of selected biomass types from four regions of Mexico, for bioenergetic purposes. *BioResources* 16(3), 5694-5705. <https://doi.org/10.15376/biores.16.3.5694-5705>

Hernández-Méndez, J., Pintor-Ibarra, L.F., Alvarado-Flores, J.J., Berrueta-Soriano, V.M., Ruiz-Aquino, F., Rutiaga-Quñones, J.G. (2026). Use of Fabaceae and pine sawdust as alternatives to pelletizing for energy purposes. *Next Sustainability* 7, 100340. <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2026.100340>

ISO 16948 (2015). Solid biofuels – Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen, International Organization for Standardization, Geneva.

ISO 16967 (2015). Biocombustibles sólidos – Determinación de elementos mayoritarios – Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na y Ti, Beuth Verlag, Berlín.

ISO 16994 (2016). Solid biofuels – Determination of total content of sulfur and chlorine, International Organization for Standardization, Geneva.

Jiménez-Mendoza, M. E., Ruiz-Aquino, F., Aquino-Vásquez, C., Santiago-García, W., Santiago-Juárez, W., Rutiaga-Quñones, J. G. (2023). Aprovechamiento de leña en una comunidad de la Sierra Sur de Oaxaca, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 14(76), 22-49. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i76.1300>

Kim, H., Yu, S., Kim, M., Ryu, C. (2022). Progressive deconvolution of biomass thermogram to derive lignocellulosic composition and pyrolysis kinetics for parallel reaction model. *Energy*, 254, 124446. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124446>

Martínez-Pérez, R., Pedraza-Bucio, F. E., Orihuela-Equihua, R., López-Albarrán, P., Rutiaga-Quñones, J. G. (2015). Calorific value and inorganic material of ten Mexican wood species. *Wood Research*, 60(2), 281-292.

Moya, R., Rodríguez-Zúñiga, A., Puente-Urbina, A. (2017). Thermogravimetric and devolatilisation analysis for five plantation species: Effect of extractives, ash compositions, chemical compositions and energy parameters. *Thermochimica Acta*, 647, 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2016.11.014>

Musule, R., Acuña, E., Romero-Hermoso Osorio, L. S., Domínguez, Z., Bárcenas-Pazos, G. M., Pineda-López, M. R., Teixeira Mendonça, R., González, M. E., Sánchez-Velásquez, L. R. (2018). Growing up at different altitudes: changes in energy content of the *Abies religiosa* wood. *BioEnergy Research*, 11(1), 209-218. <https://doi.org/10.1007/s12155-017-9889-5>

Ngangyo Heya, M., Romo Hernández, A. L., Foroughbakhch Pournavab, R., Pintor Ibarra, L. F., Díaz-Jiménez, L., Heya, M. S., Salas Cruz L. R., Carrillo Parra, A. (2022). Physicochemical characteristics of biofuel briquettes made from pecan (*Carya illinoensis*) pericarp wastes of different particle sizes. *Molecules*, 27(3), 1035. <https://doi.org/10.3390/molecules27031035>

Nurazzi, NM, Asyraf, MRM, Rayung, M., Norrrahim, MNF, Shazleen, SS, Rani, MSA, Shafi, AR, Aisyah, HA, Radzi, MHM, Sabaruddin, FA, Ilyas, RA, Zainudin, ES., Abdan, K. (2021). Propiedades del análisis termogravimétrico de compuestos poliméricos de fibras naturales celulósicas: una revisión sobre la influencia de los tratamientos químicos. *Polímeros*, 13 (16), 2710. <https://doi.org/10.3390/polym13162710>

Obernberger, I., Thek, G. (2010). *The pellet handbook: the production and thermal utilisation of pellets*. London-Washington DC: Routledge.

Palacios Romero, A., Jiménez Muñoz, E., Rodríguez Laguna, R., Razo Zárate, R. (2021). Distribución potencial de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd.) MC Johnst. en el estado de Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12, 71-87 <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i63.812>

Palamani, A., Khongphakdi, P., Tirawanichakul, Y., Phusunti, N. (2019). Investigation of yields and qualities of pyrolysis products obtained from oil palm biomass using an agitated bed pyrolysis reactor. *Biofuel Res. J.* 6, 1065–1079. <https://doi.org/10.18331/BRJ2019.6.4.3>

Pintor-Ibarra, L. F., Carrillo-Parra, A., Herrera-Bucio, R., López-Albarrán, P., Rutiaga-Quiñones, J. G. (2017). Physical and chemical properties of timber byproducts from *Pinus leiophylla*, *P. montezumae* and *P. pseudostrobus* for a bioenergetic use. *Wood Research*, 62(6), 849-861.

Pintor-Ibarra, L.F., Méndez-Zetina, F.D., Rutiaga-Quiñones, J.G., Alvarado-Flores, J.J. (2023). Capítulo 5: Caracterización proximal de los biocombustibles sólidos. In *Aplicaciones Energéticas de la Biomasa: Perspectivas para la Caracterización Local de Biocombustibles Sólidos*; Universidad Intercultural Indígena de Michoacán: Pátzcuaro, México. pp. 87–116.

Poletto, M., Ornaghi Junior, H. L., Zattera, A. J. (2014). Native cellulose: structure, characterization and thermal properties. *Materials*, 7(9), 6105-6119. <https://doi.org/10.3390/ma7096105>

Popp, J., Kovács, S., Oláh, J., Divéki, Z., Balázs, E. (2021). Bioeconomy: Biomass and biomass-based energy supply and demand. *New biotechnology*, 60, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.10.004>

R Studio (2020). *A Language and Environment for Statistical Computing; R Foundation for Statistical Computing*. Vienna, Austria.

Racero-Galaraga, D., Rhenals-Julio, J. D., Sofan-German, S., Mendoza, J. M., Bula-Silvera, A. (2024). Proximate analysis in biomass: Standards, applications and key characteristics. *Results in Chemistry*, 12, 101886. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101886>

Ramírez-Casillas, R., López-López, M. C., Becerra-Aguilar, B., Dávalos-Olivares, F., Satyanarayana, K. G. (2019). Obtaining dissolving grade cellulose from the huizache (*Acacia farnesiana* L. Willd.) plant. *BioResources* 14(2), 3301-3318. <https://doi.org/10.15376/biores.14.2.3301-3318>

Rani, M. S. A., Mohammad, M., Sua'it, M. S., Ahmad, A., Mohamed, N. S. (2021). Novel approach for the utilization of ionic liquid-based cellulose derivative biosourced polymer electrolytes in safe sodium-ion batteries. *Polymer Bulletin*, 78(9), 5355-5377. <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03382-2>

Rego, F., Dias, A. P. S., Casquilho, M., Rosa, F. C., Rodrigues, A. (2019). Fast determination of lignocellulosic composition of poplar biomass by thermogravimetry. *Biomass and bioenergy*, 122, 375-380. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.037>

Rendón Correa, A., Dorantes Hernández, F., Mejía Valencia, S., Alamilla Fonseca, L. N. (2021). Características macroscópicas, propiedades y usos de la madera de especies nativas y exóticas de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Tlalpan, Ciudad de México.

Rico-Arce, M. L., Gale, S. L., Maxted, N. (2008). A taxonomic study of *Albizia* (Leguminosae: Mimosoideae: Ingeae) in Mexico and Central America. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 65, 255–305. <https://doi.org/10.3989/ajbm.2008.v65.i2.29>

Rodríguez-Romero, L. A., Gutiérrez-Antonio, C., García-Trejo, J. F., Feregrino-Pérez, A. A. (2022). Estudio comparativo de modelos matemáticos para predecir el poder calorífico de residuos agrícolas mexicanos. *Tecnológicas*, 25(53). <https://doi.org/10.22430/22565337.2142>

Rotz, L., Giazzi, G. (2012). *Characterization of Pharmaceutical Products by the Thermo Scientific FLASH 2000 Elemental Analyzer*; Thermo Fischer Scientific: Milan, Italy.

Ruiz-Aquino, F., Jiménez-Mendoza, M. E., Santiago-García, W., Suárez-Mota, M. E., Aquino-Vásquez, C., Rutiaga-Quñones, J. G. (2022). Energy properties of 22 timber species from Oaxaca, Mexico. *South-east European forestry: SEEFOR*, 13(2), 107-113. <https://doi.org/10.15177/seefor.22-13>

Rutiaga-Quñones, J.G., Pintor-Ibarra, L.F., Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Ramírez-Ramírez, M.A., Carrillo-Avila, N., Carrillo-Parra, A., Navarrete-García, M.A., Ruiz-Aquino, F.; Rangel-Méndez, J.R., Hernández-Solís, J., Lujan-Alvarez, C. (2020). Characterization of Mexican waste biomass relative to energy generation. *BioResources*, 15, 8529–8553. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.8529-8553>

Salazar-Herrera, F., Pintor-Ibarra, L. F., Musule, R., Nava-Berumen, C. A., Alvarado-Flores, J. J., González-Ortega, N., Rutiaga-Quñones, J. G. (2023). Chemical and energetic properties of seven species of the Fabaceae family. *South-east European forestry: SEEFOR*, 14(2), 215-224. <https://doi.org/10.15177/seefor.23-19>

Saldarriaga, J. F., Aguado, R., Pablos, A., Amutio, M., Olazar, M., Bilbao, J. (2015). Fast characterization of biomass fuels by thermogravimetric analysis (TGA). *Fuel*, 140, 744-751. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.024>

Segers, B., Nimmegeers, P., Spiller, M., Tofani, G., Jasiukaitytė-Grojsdek, E., Dace, E., Kikas T., Marchetti, J. M., Rajic, M., Yildiz, G., Billen, P. (2024). Lignocellulosic biomass valorisation: a review of feedstocks, processes and potential value chains and their implications for the decision-making process. *RSC sustainability*, 2(12), 3730-3749. <https://doi.org/10.1039/d4su00342j>

Shrestha, B., Posom, J., Sirisomboon, P., Shrestha, B. P., Pornchaloempong, P., & Funke, A. (2024). NIR spectroscopy as an alternative to thermogravimetric analyzer for biomass proximate analysis: comparison of chip and ground biomass models. *Energies*, 17(4), 800. <https://doi.org/10.3390/en17040800>

Sophonrat, N., & Wooldridge, M. (2024). Revisiting biomass compositions determination using thermogravimetric analysis and independent parallel reaction model. *Thermochimica Acta*, 739, 179814. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2024.179814>

Skreiberg, A., Skreiberg, Ø., Sandquist, J., Sørum, L. (2011). TGA and macro-TGA characterisation of biomass fuels and fuel mixtures. *Fuel*, 90(6), 2182-2197. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.02.012>

Somarin, T., Parker, A., McAdam, E., Williams, L., Tyrrel, S., Kolios, A., Jiang, Y. (2020). Pyrolysis characteristics and kinetics of human faeces, simulant faeces and wood biomass by

thermogravimetry–gas chromatography–mass spectrometry methods. *Energy Reports*, 6, 3230–3239. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.164>

Sjöström, E. (1981). *Wood Chemistry: Fundamentals and Applications*; Academic Press, Inc.: London, UK, pp. 49–102.

TAPPI T264 cm-97 (2000). Preparation of wood for chemical analysis. TAPPI Press, Atlanta, USA.

Torres Jaramillo, D., Morales Vélez, S. P., Quintero Díaz, J. C. (2017). Evaluación de pretratamientos químicos sobre materiales lignocelulósicos. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería* 25(4), 733–743. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052017000400733>

UNE-EN 14961-1 (2011). Especificaciones y clases de combustibles. Parte 1: requisitos generales. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, Spain.

UNE-EN ISO 18125 (2018). Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, Spain.

UNE-EN ISO 17225-1 (2020). Biocombustibles Sólidos. Especificaciones y Clases de Combustibles. Parte 1: Requisitos Generales. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, Spain.

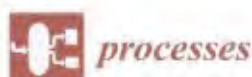
Van Soest, P.V., Robertson, J.B., Lewis, B.A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.* 74, 3583–3597. Doi: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)

Velázquez-Martí, B., Gaibor-Chávez, J., Niño-Ruiz, Z., Cortés-Rojas, E. (2018). Development of biomass fast proximate analysis by thermogravimetric scale. *Renewable energy*, 126, 954–959. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.021>

White, R.H. (1987). Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of Wood. *Wood Fiber Sci.* 19, 446–452.

Zhou, X., Li, W., Mabon, R., Broadbelt, L. J. (2017). A critical review on hemicellulose pyrolysis. *Energy Technology*, 5(1), 52–79. <https://doi.org/10.1002/ente.201600327>

10. Anexo 1: Artículo de investigación publicado



Article

Primary Constitution and Proximal Analysis of Three Fabaceae by the Thermogravimetric and Chemical Methods for Their Potential Use as Bioenergy

Luis Fernando Pintor-Ibarra ¹, José Juan Alvarado-Flores ^{1,*}, José Guadalupe Rutiaga-Quiriones ¹,
Jorge Víctor Alcaraz-Vera ², Rafael Herrera-Bucio ³, Víctor Manuel Ruiz-García ⁴
and Oswaldo Moreno-Anguiano ¹

- ¹ Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edif. D. Cd. Universitaria, Santiago Tapia No. 403, Centro, Morelia C.P. 58000, Michoacán, Mexico; luis.pintor@umich.mx (L.F.P.-I.); jose.rutiaga@umich.mx (J.G.R.-Q.); 0234033@umich.mx (O.M.-A.)
- ² Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Cd. Universitaria, Santiago Tapia No. 403, Centro, Morelia C.P. 58000, Michoacán, Mexico; jorge.alcaraz@umich.mx
- ³ Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Cd. Universitaria, Santiago Tapia No. 403, Centro, Morelia C.P. 58000, Michoacán, Mexico; rafael.herrera.bucio@umich.mx
- ⁴ Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia 58190, Mexico; vruiz@cicco.unam.mx
- * Correspondence: jjalvarado@umich.mx

Abstract

The standard methods for determining the basic chemical composition of wood are well-established, but include processes that demand a great deal of time and diverse chemical reagents. TGA and DTG analyses, in contrast, offer precise results in less time. This study was designed to identify the primary components and results of the proximal analysis of wood from three species—*Acacia farnesiana*, *A. pennatula* and *Albizia plurijuga*—using TGA with deconvolution of the DTG curve and a chemical method. Higher heating value (HHV) was determined using a bomb calorimeter and mathematical models. Elemental organic and inorganic analyses were conducted. No statistically significant differences appeared in the results of the TGA-DTG and chemical methods for the wood in terms of cellulose, lignin, and volatile material content. Results were especially accurate in the samples of *A. pennatula* and *A. plurijuga* for hemicelluloses, extractives, and moisture. Regarding HHV, the wood of *A. plurijuga* showed no statistically significant differences between the bomb calorimeter test, calculations as a function of chemical composition, or the proximal analysis. Elemental organic results were C = 43.76–46.65%; H = 6.70–6.95%; O = 46.06–48.95%; N = 0.21–0.42%; and S = 0.06–0.11%. For the inorganic fraction we identified 18 elements in the ash. We conclude that the TGA-DTG method made it possible to obtain results in a short time with no need for the numerous reagents that chemical processes require. Findings suggest that in the absence of a bomb calorimeter, the best model for calculating HHV is proximal analysis.

Keywords: primary components; pyrolysis; TGA-DTG; Fabaceae



Academic Editor: Juan Francisco García Martín

Received: 17 October 2025

Revised: 24 November 2025

Accepted: 26 November 2025

Published: 3 December 2025

Citation: Pintor-Ibarra, L.F.; Alvarado-Flores, J.J.; Rutiaga-Quiriones, J.G.; Alcaraz-Vera, J.V.; Herrera-Bucio, R.; Ruiz-García, V.M.; Moreno-Anguiano, O. Primary Constitution and Proximal Analysis of Three Fabaceae by the Thermogravimetric and Chemical Methods for Their Potential Use as Bioenergy. *Processes* **2025**, *13*, 3907. <https://doi.org/10.3390/pr13123907>

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Biomass is a renewable energy source that offers two significant advantages: first, it can be used as biofuel in solid, liquid, or gaseous forms; second, it is a net zero-carbon

source since the amount of CO₂ released during its use as energy is virtually equal to the amount captured by the plants through photosynthesis [1,2]. Biomass is also much more ecofriendly than the fossil fuels on which the global economy largely depends for producing electricity, heat, chemical products, other fuels, and energy because combustion contributes directly to atmospheric pollution [3,4].

The trees of the species *A. farnesiana*, *A. pennatula* and *A. plurijuga* belong to the Fabaceae family, classified as angiosperms, which are the most diverse worldwide and best represented in Mexico, where they constitute the second most diverse group of plants, estimated to be distributed across 50% of the national territory. They inhabit deciduous forests, grow in semiarid climates, and are of great ecological importance because they fix nitrogen in eroded soils and have important economic uses in the study area: the wood of *A. farnesiana* is used in rural construction, posts, fences, and tool handles, and its aromatic flowers are used in the perfume industry [5]. The leaves and fruits of *A. pennatula* are used as livestock feed, and its wood is used for fence posts, rural construction, tools, and fuel [6]. In the distribution area of *A. plurijuga*, its wood is used for construction purposes and in the study area it is used as firewood for cooking, posts to mark farmland, ornamental trees, and is currently being widely used in reforestation due to its rapid growth.

In relation to previous studies on the chemical composition of the wood of the three Fabaceae, the following works are noteworthy: for *A. farnesiana*, its wood has been proposed for the manufacture of cellulose for paper, where the fractions of lignin, holocellulose, hemicellulose, and ash have been characterized by chemical methods [7]. On the other hand, Ruiz-Aquino et al. report the proximal analysis and calorific value of the wood of this species [8]. Studies have been conducted on the energy characteristics of *A. pennatula*, such as proximal analysis and calorific value [9], and chemical and energy characteristics of the bark, sapwood, and heartwood of *A. plurijuga* have recently been reported [10].

Nowadays, the consumption of biomass has increased to represent 10% of all energy production worldwide [11] and it is estimated that in about 30 years, approximately 20% of energy generation could be achieved [12]. However, since this is a heterogeneous material, its chemical make-up and energy content must be determined to optimize utilization. To this end, diverse methodologies exist to identify the chemical composition and energy properties of biomass (e.g., proximal analysis and higher heating value [HHV]). Researchers choose a specific methodology to select one of the options available and apply it according to the precise type of biomass they study and the resources they have at hand [13]. Standard chemical methods are the characterization methodologies most often utilized to conduct proximal analyses (moisture, volatile matter, fixed carbon, and ash content) and compositional analysis (cellulose, hemicellulose, and lignin) which involves distinct chemical methods. Ascertaining the fractions of these substances involves mainly gravimetric calculations, but these approaches are routine, complex, time-consuming, costly, and the possibility of increasing the error and requiring multiple chemical reagents [14,15]. Consequently, the results may have a considerable margin of error because the separation of the components is not performed completely effectively [16]. In this sense, an optimal methodology that allows for the quantification of primary components is essential. The thermogravimetric (TGA) analysis is an alternative that can handle such expectations. The method TGA with deconvolution of the first derivative (DTG) permits determining the distinct stages of the thermal degradation of biomass based on numerical data. Recently, some researchers have reported this deconvolution for the calculation of lignocellulosic components [1,17]. It should be noted that the DTG curve deconvolution technique has some limitations, mainly the cost of TGA equipment, which is generally high. It should be noted that, in the thermal process of pyrolysis, in an atmosphere such as nitrogen, conditions and processes that are compatible at an industrial level are used. During pyrolysis—the thermal

processing of biomass in an oxygen-free environment—two main stages are identified: first, moisture loss; second, the loss of the three structural components: cellulose, hemicellulose, and lignin [1]. TGA analysis, in particular DTG, allows the different stages of lignocellulosic material conversion calculation to be performed under pyrolysis conditions, allows precise quantifications, requires less time, is replicable, and minimizes the use of chemical reagents [18,19].

Against this background, the objectives of the present study were to (i) contribute to the development of new methodologies and (ii) augment our knowledge of the chemical and energy properties of wood, using as raw materials the three above-mentioned species of the Fabaceae family.

2. Materials and Methods

2.1. Sample Collection and Preparation

We collected three individuals of each species—*A. farnesiana*, *A. pennatula*, *A. plurijuga*—in the Cuitzeo Lake Basin in the state of Michoacán, Mexico, between the coordinates 19°57'49" N 101°6'21" O and 19°59'3" N 101°8'45" O, then selected one 10 cm thick cross-section (disk) taken at chest height (1.30 cm). The bark was separated and the wood splintered manually. Once prepared, the splinters were dehydrated under shade to a moisture percentage of 12%. The samples used to grind the samples were prepared in accordance with norm TAPPI 264 cm-97 [20]. The resulting sawdust was sieved in an RO-TAP machine (Model RX-29, W.S. Tyler, Mentor, OH, USA) using standard mesh ASTM E11-20 [21], numbers 20, 40, and 60. A −20 + 40 mesh meal wood (425 µm) was used to perform five analyses: chemical, TGA-DTG, proximal, elemental, and HHV.

2.2. Primary Constitution and Proximal Analysis by the TGA-DTG and Chemical Methods

2.2.1. Thermogravimetric Method (TGA-DTG)

Pyrolysis (TGA) of the wood was performed based on the parameters reported by Pintor-Ibarra et al. [9] in a Perkin Elmer Inc., Wellesley, MA, USA STA 6000 thermogravimetric analyzer (Pyris™ software). The ASTM D5142-90 standard [22] for the heating ramp under controlled conditions made it possible to obtain the proximal analysis. The curve of the first DTG derivative was then determined by deconvolution. The algorithm developed allowed us to calculate the fractions of the primary components—cellulose, hemicelluloses, lignin—as a function of the loss of mass from the sample [13,18]. Table 1 displays the specifications of the methods employed. In the thermogravimetric analysis, three samples were considered for each Fabaceae species, and the tests were performed in triplicate for each sample.

2.2.2. Chemical Method

Moisture was determined using a thermobalance (Benetech Inc., Model Gm640, Aurora, IL, USA), following norm ASTM D4442-20 [23]. Ash and volatile material content were calculated according to norms ASTM D1102-84 [24] and ASTM E872-82 [25], respectively. Fixed carbon was determined by difference. Table 1 shows the equation. Primary chemical constitution was performed in an Ankom Model A200 fiber analyzer (ANKOM Technology, Macedon, NY, USA) based on the methodology in Van Soest et al. [26]. The procedure is summarized in Table 1.

$$\% \text{ extractives} = 100 - \% \text{ NDF} \quad (1)$$

$$\% \text{ hemicelluloses} = \% \text{ NDF} - \% \text{ ADF} \quad (2)$$

$$\% \text{ lignin} = \% \text{ IL} - \% \text{ ash} \quad (3)$$

$$\% \text{ fixed carbon} = [100 - (\% \text{ ash} + \% \text{ volatile material})] \quad (4)$$

Table 1. Specifications of the TGA-DTG and chemical methods.

Thermogravimetry (TGA)	Deconvolution (DTG)	Chemical Method
Pyrolysis was conducted in an inert atmosphere with nitrogen gas (N_2, 99.99% purity) at a flow rate of 20 mL/min. Heating and cooling speeds were 30 °C/min, divided into four stages to complete the proximal analysis. Stage 1: began at 25–100 °C for 80 min to determine the % of moisture. Stage 2: 100–700 °C for 30 min to obtain the amount of fixed carbon. Stage 3: oxygen was applied for 5 min at 700 °C to eliminate organic material residues. Stage 4: cooling from 700 to 25 °C in 20 min. The residue left represented the ash. The % of volatile material was calculated as $VM = [100 - (\% \text{ moisture} + \% \text{ ash} + \% \text{ fixed carbon})]$. Over 80,000 pieces of data were obtained from each sample. Time required for the procedure: 160 min/sample.	DTG Deconvolution was used to determine the primary components: cellulose, hemicelluloses, and lignin. The graphs of the obtained curves were plotted in the Scilab platform. We utilized the ODE subroutine (ordinary differential equations) based on the Adams method for non-rigid ODE problems that integrates the differential equation multiple linear regressions. To calculate the ODE function, a function containing the ordinary differential equations is constructed using arithmetic operators. This is achieved by identifying the number of variables that change over time and the corresponding rates of change that allow the calculation of the percentages of the main components of biomass, i.e., hemicellulose, cellulose, and lignin. This is usually the most complex part, because the optimization function must be constructed, i.e., ultimately ensuring that Scilab finds the best possible values for the mathematical model to predict the experimental results. To achieve this, the combination of adjustment parameters that minimizes the value of an error objective function is found, which in this case is the difference between the results calculated with the model and those measured experimentally. The evolution of the temperature over time, the conversion of each polymer, and the overall conversion will then be calculated, and from there, the change ratio predicted by the model with that combination of adjustment parameters can be calculated. Optimization of the kinetic parameters to adjust the experimental results was carried out with the <i>Fminsearch</i> subroutine, based on Nelder and Mead's algorithm. To calculate the percentages of water, carbon, and ash, the initial mass value is considered, as well as the start and end times of the drying process. Subsequently, the start time of the pyrolysis process is considered, and commands are integrated into Scilab to calculate the percentages of water, carbon, and ash. In addition, conversion factors for mass (grams), time (seconds), and temperature (kelvin) are integrated. The % of extractives was calculated by difference: $\% \text{ extractives} = [100 - (\% \text{ cellulose} + \% \text{ hemicelluloses} + \% \text{ lignin} + \% \text{ ash})]$.	The fiber and proximal analyses and the calculations of results were obtained based on anhydrous weight. Neutral detergent fiber (NDF): digestion with 20 g of Na_2SO_3, 4 mL of α-amylase at 100 °C for 75 min, followed by washing in hot H_2O and CH_3CH_3 with dehydration at 100 °C for 24 h. Acid detergent fiber (ADF): conducted with 20 g of $C_{10}H_{12}BrN$ in 1 L of H_2SO_4 1 N for 60 min, followed by washing with hot H_2O and CH_3CH_3 and dehydration at 100 °C for 24 h. Insoluble lignin (IL): digestion with H_2SO_4 at 72% for 90 min, then washing with hot H_2O and dehydration at 100 °C for 24 h. Equations (1)–(4) were used to calculate the percentages of extractables, hemicelluloses, lignin and fixed carbon. Time required for the procedure = 76 h per lot of 16 samples.

2.3. Higher Heating Value

HHV was obtained in a bomb calorimeter (LECO AC 600, LECO Corporation, St. Joseph, MO, USA) in strict accordance with the parameters stipulated in norm UNE-EN ISO 18125 [27]. The HHV was calculated using mathematical models that took into account lignin fractions and chemical composition extracts, according to White [28]. The proximal analysis also considered the amounts of fixed carbon and ash based on data from Cordero et al. [29] and employed the mathematical model that resulted from the elemental analysis [30].

2.4. Elemental and Inorganic Analyses

The elemental analysis of the wood was conducted in a model 2400 CHNS-O Perkin-Elmer analyzer [31]. Sulfur content was calculated by the turbidimetric method using gum arabic. Oxygen content was determined by difference based on the reports by Ghetti et al. [32]. The inorganic elements of the ash were identified in an inductively cou-

pled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES) (VARIAN 730-ES, Varian Inc. (Agilent), Mulgrave, Australia), following the recommendations in Arcibar-Orozco et al. [33].

2.5. Statistical Analysis

The primary constitution and proximal analysis were calculated using TGA-DTG and chemical methods. The statistical analysis of HHV was determined using analysis of variance and Tukey's test ($p \leq 0.05$) using the R Studio software, per Ref. [34], for each response variable, as follows: cellulose, hemicelluloses, lignin, extractives, ash, volatile material, fixed carbon, and moisture. For the elemental analysis we report the mean value $\pm$ standard deviation, only one determination was made for the specific case of the microanalysis of ash.

3. Results and Discussion

3.1. Primary Constitution: Proximal Analysis by the Thermogravimetric and Chemical Methods

Chemical methods require diverse chemical substances. Careful handling of the residues produced during the procedure was obligatory because the filtrates from the washings, for example, can be harmful for the environment. In contrast, the TGA-DTG method provides results for both chemical components and proximate analysis with minimal amounts of chemicals and reduced fire risk [19]. One disadvantage of this approach compared to chemical methods is that it processes the material one sample at a time while the latter can analyze up to multiple samples at once, depending on equipment capacity. Regarding the primary constitution and proximal analysis of the wood of the three Fabaceae species, no statistically significant differences ($p \leq 0.05$) were found between these two methods for the structural component—cellulose, lignin—or volatile material (Table 2). These components represented the largest proportion of the lignocellulosic material. The TGA-DTG approach allowed us to obtain results in less time (Table 2, Figure 1a,b, Figure 2a,b and Figure 3a,b). In addition, for the independent thermal degradation of the three main chemical components of wood (cellulose, hemicelluloses, lignin) by pyrolysis, this novel method can accurately predict the deconvolution parameters of DTG and optimize results using mathematical calculations such as multiple linear regression [10,35]. The samples of *A. pennatula* and *A. plurijuga* showed no statistical differences for hemicelluloses, extractives, or moisture (Table 2). Other reports based on these methods found no statistical differences for cellulose and extractives in the wood of *Prosopis laevigata* [13]. Overall, no statistically significant differences were observed ($p \leq 0.05$) among the species and methods for the fractions of lignin (Table 2).

Statistically significant differences were found ($p \leq 0.05$), however, for fixed carbon (Table 2). There, we explain that for the chemical methods the percentage of fixed carbon was obtained on the basis of the anhydrous weight of the ash and volatile matter compared to the thermal method, where the equation subtracted the fraction of moisture. This issue was discussed recently in other studies [13], clearly establishing that the moisture content of biomass is a key aspect that must be taken into account in all methodologies adopted due to its hygroscopic nature that—in the presence of atmospheric moisture—can vary on the same day and even at distinct hours [9]. Finally, both methodologies are limited in terms of their ability to obtain extractable substances to evaluate the bioactive compounds of plants because the thermal process degrades at low temperatures and the traditional method hydrolyzes when chemical reagents are used.

In other reports that determined the basic chemical composition of samples of *A. farnesiana* wood by chemical methods, we found that *A. pennatula* and *A. plurijuga* had the following proportions: cellulose = 45.58–58.83%; hemicelluloses = 12.83–20.85%; lignin = 10.60–14.30%; extractives = 13.44–17.29%; and ash = 1.07–2.89% [36]. In some

cases—cellulose, extractives, and ash, for instance—results are similar to those of the present study, but for hemicelluloses and lignin distinct values were determined. For proximal analyses by the traditional method, other studies have reported the following intervals in wood from *A. farnesiana*, *A. pennatula*, and *A. plurijuga*: volatile material = 78.04–59% and fixed carbon = 12.32–17.44% [8,36,37]. These results are comparable to ours (Table 2).

Table 2. Chemical composition and proximate analysis by TGA-DTG and chemical methods of *A. farnesiana*, *A. pennatula*, and *A. plurijuga* woods.

Method	<i>A. farnesiana</i>	<i>A. pennatula</i>	<i>A. plurijuga</i>
Cellulose (%)			
TGA-DTG	57.49 ^{A,a} (± 0.51)	54.19 ^{A,b} (± 1.78)	58.73 ^{A,a} (± 0.74)
Chemical	58.03 ^{A,b} (± 0.68)	54.96 ^{A,c} (± 0.34)	60.10 ^{A,a} (± 0.45)
Hemicelluloses (%)			
TGA-DTG	11.03 ^{B,a} (± 0.21)	11.41 ^{A,a} (± 0.54)	11.15 ^{A,a} (± 0.10)
Chemical	11.75 ^{A,a} (± 0.27)	11.50 ^{A,ab} (± 0.46)	10.81 ^{A,b} (± 0.33)
Lignin (%)			
TGA-DTG	18.98 ^{A,a} (± 0.01)	19.20 ^{A,a} (± 1.49)	18.06 ^{A,a} (± 1.08)
Chemical	19.21 ^{A,a} (± 0.38)	19.24 ^{A,a} (± 0.65)	18.16 ^{A,a} (± 0.81)
Extractives (%)			
TGA-DTG	12.46 ^{A,a} (± 0.71)	15.16 ^{A,a} (± 3.75)	12.04 ^{A,a} (± 1.39)
Chemical	10.78 ^{B,b} (± 0.17)	13.96 ^{A,a} (± 0.12)	10.73 ^{A,b} (± 0.29)
Ash (%)			
TGA-DTG	2.30 ^{A,b} (± 0.01)	2.90 ^{A,a} (± 0.11)	1.41 ^{A,c} (± 0.21)
Chemical	1.80 ^{B,b} (± 0.01)	2.57 ^{B,a} (± 0.02)	1.09 ^{A,c} (± 0.05)
Moisture (%)			
TGA-DTG	5.84 ^{A,a} (± 0.17)	3.83 ^{A,b} (± 0.91)	4.11 ^{A,b} (± 0.32)
Chemical	5.35 ^{B,a} (± 0.23)	4.36 ^{A,b} (± 0.17)	4.50 ^{A,b} (± 0.17)
Fixed carbon (%)			
TGA-DTG	13.43 ^{B,ab} (± 0.52)	12.83 ^{B,b} (± 0.13)	14.04 ^{B,a} (± 0.13)
Chemical	19.07 ^{A,a} (± 0.08)	18.26 ^{A,a} (± 0.83)	18.24 ^{A,a} (± 0.25)
Volatile material (%)			
TGA-DTG	78.34 ^{A,b} (± 0.69)	80.40 ^{A,a} (± 0.74)	80.50 ^{A,a} (± 0.79)
Chemical	79.12 ^{A,b} (± 0.07)	79.15 ^{A,b} (± 0.82)	80.67 ^{A,a} (± 0.25)

Identical capital letters in columns indicate no statistical difference between methods, and identical lowercase letters in rows indicate no statistical difference between species (Tukey, $p = 0.05$) for each response variable: cellulose, hemicellulose, lignin, extractives, ash, moisture, fixed carbon, and volatile material.

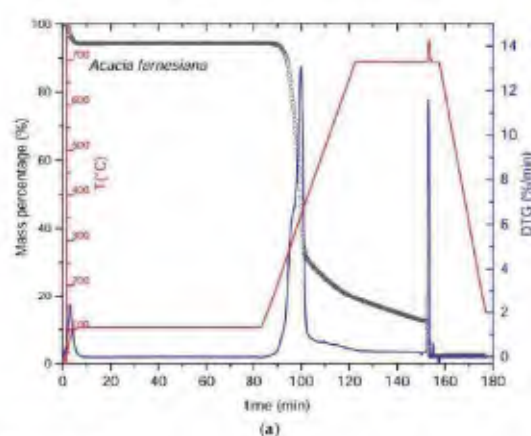


Figure 1. Cont.

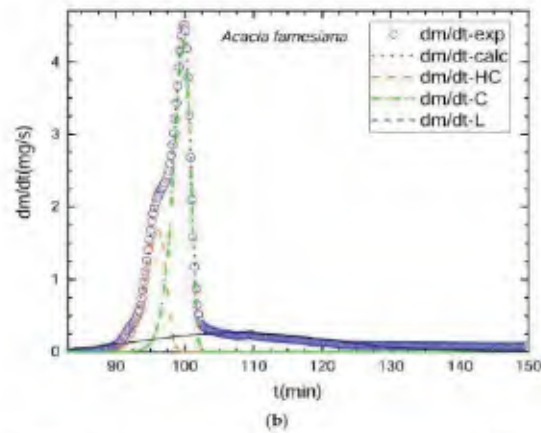


Figure 1. (a). TGA and DTG curves of *A. farnesiana* wood. (b). Deconvoluted DTG curve of *A. farnesiana* wood. Exp = experimental graphs, Calc = calculated graphs, HC = hemicellulose, C = cellulose, and L = lignin.

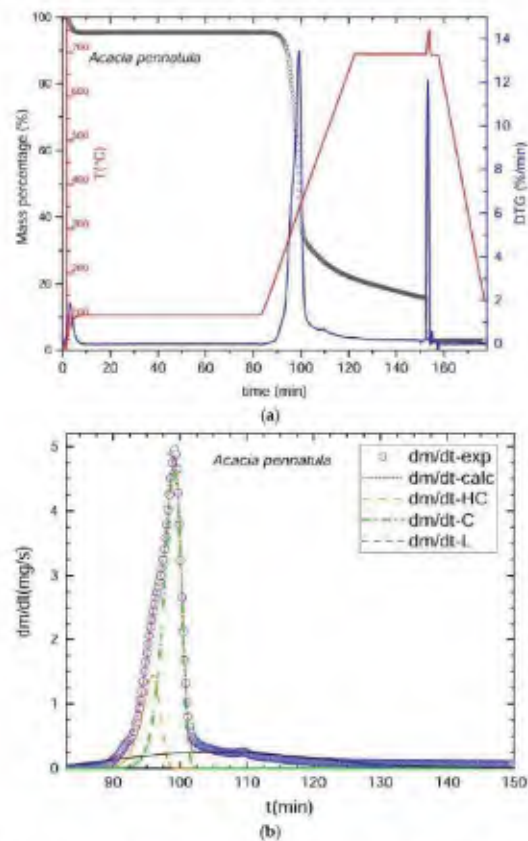


Figure 2. (a). TGA and DTG curves of *A. pennatula* wood. (b). Deconvoluted DTG curve of *A. pennatula* wood. Exp = experimental graphs, Calc = calculated graphs, HC = hemicellulose, C = cellulose, and L = lignin.

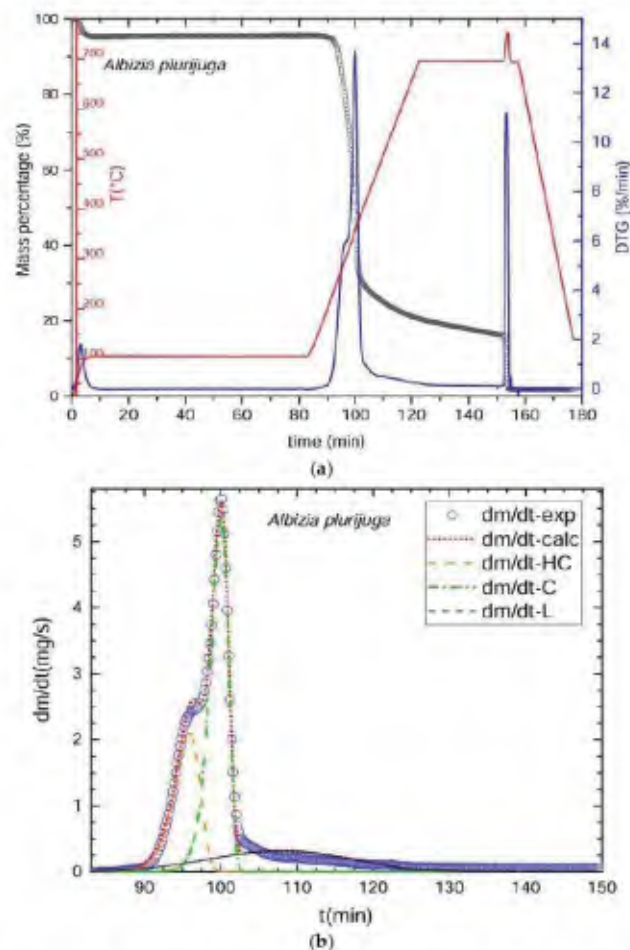


Figure 3. (a). TGA and DTG curves of *A. plurijuga* wood. (b). Deconvoluted DTG curve of *A. plurijuga* wood. Exp = experimental graphs, Calc = calculated graphs, HC = hemicellulose, C = cellulose, and L = lignin.

3.2. Thermogravimetric Process

Figures 1a, 2a and 3a show, in black, the curves from the thermogravimetric analysis of the woods of *A. farnesiana*, *A. pennatula* and *A. plurijuga* where the loss of mass is represented as a function of temperature and time. By examining this process, we obtained the proximal analysis (moisture, volatile material, fixed carbon, ash). As a guide to explaining pyrolysis, we also show the heating ramp in those figures—in red—as a function of temperature and time. First, in the 0–80 min at 100 °C zone, the samples of wood lost water, a result consistent with another research [38]. Other publications report that a loss of a fraction of extractable substances (waxes, gums, terpenes, tannins, polyphenols, and carbohydrates, among others) occurs during this stage [39,40]. Returning to the description of the left side of these graphs, the blue color represents the peaks of the DTG that correspond to the moisture in the wood.

A second stage in the biomass disintegration process is presented as follows. Dehydration of the biomass was followed by the thermal decomposition of the organic components

of the wood, that is, extractives, hemicelluloses, cellulose, and lignin. This process began as shown in Figures 1a, 2a and 3a in the time interval of 80–150 min at temperatures of 100–700 °C, the zone where fixed carbon was obtained. This second stage was marked by the greatest weight loss in the woods of *A. farnesiana*, *A. pennatula*, and *A. plurijuga*, a phenomenon consistent with reports which affirm that the maximum decomposition speed of wood in a nitrogen atmosphere occurs at 350–370 °C, with weight losses of up to 80%. This is related mainly to the degradation of carbohydrates: cellulose and the hemicelluloses [40,41]. Figures 1a, 2a and 3a also show the central signal. The largest proportion appears in blue. It is important to mention that this signal provides valuable information on the key changes that occur in biomass in relation to the reaction temperatures and decomposition speeds in a given time. On that basis, it is possible to derive the deconvolution process that we depict graphically in Figures 1b, 2b and 3b. Finally, on the right side of graphs Figures 1a, 2a and 3a, the signal of a lower proportion is visible. It expresses the combustion of the remaining organic material when oxygen was applied during pyrolysis after cooling the residue that corresponded to the ash.

3.3. Deconvolution of the DTG Curves

The deconvolution of the DTG analysis for each species is shown in Figures 1b, 2b and 3b. The expression $dm/dt\text{-exp}$ relates to the thermogram obtained experimentally using the equipment; the expression $dm/dt\text{-calc}$ relates to the thermogram calculated using the proposed logarithm. The behavior of the DTG curves (Figures 1b and 2b) for the woods of these *Acacias* is similar in terms of deformation and height. In contrast to other studies that have utilized this method with aquatic, agricultural, and forest biomasses—including the bark and wood of conifers—our study generated peaks with distinct dimensions attributable to variations in their primary constituents [9,14]. Regarding the reaction patterns of the hemicelluloses and cellulose, Figures 1b and 2b show similar peaks for the wood of these *Acacias*. Figure 3b, in contrast, which refers to the wood of *A. plurijuga*, shows a higher signal for both carbohydrates. This tendency was also found for lignin, as it presented a slightly higher signal at 110 min (Figure 3b). Reports document that because cellulose is a linear polymer with abundant glucose [42] units it requires greater activation energy and a higher reaction speed; hence, the curves it generates are more pronounced [43]. The hemicelluloses, meanwhile, require less activation energy at low temperatures, attributed principally to their amorphous structure. Because the structure of lignin contains distinct functional groups, it requires less activation energy than the carbohydrates, though its reaction speed is lower and persists across a broad temperature range. For this reason, it presents wider areas under the curves [14,44,45]. In the following paragraphs we outline the thermal properties of the primary constituents of the three woods.

Independent thermal degradation by thermogravimetry of the three primary components of wood (cellulose, hemicelluloses, lignin) can accurately predict the parameters of the deconvolution of the DTG. In addition, utilizing thermogravimetry with its derivative (DTG) based on weight loss as a function of time is highly reliable since this signal is much more sensitive to small changes [14,35]. Moreover, thermogravimetric analyses offer great precision and replicability [19].

It is important to emphasize, first, that the hemicelluloses, which are shorter molecules than cellulose and, in some cases present ramifications, are found in close association with cellulose [46]. Hemicelluloses contain five principal sugars: glucose, mannose, galactose, xylose, and arabinose [47]. Figures 1b, 2b and 3b show—in orange—the results for the 90–100 min time interval of the deconvolution of the derivative of the TGA of the three species of wood analyzed (*A. farnesiana*, *A. pennatula*, *A. plurijuga*). From earlier studies we

know that hemicelluloses are non-crystalline polymers that are easily hydrolyzed, and that their thermal degradation occurs in the range of 200–300 °C [48–50].

Second, the most abundant structural polymers in wood correspond to cellulose, which represents approximately 50% in both broadleaf trees and conifers. Cellulose is a high molecular weight linear polymer made up exclusively of units of β -D-glucose [51]. The peaks for the woods of the three Fabaceae are shown in green in Figures 1b, 2b and 3b. Reports in the literature identify the following thermal properties of cellulose: crystalline regions that contribute to its rigidity and thermal stability; free hydroxyl groups present in its molecules that form intramolecular and intermolecular hydrogen bonds which foster the formation of various ordered molecular arrays; and thermal degradation that occurs between 240 and 400 °C [1,19,39,52].

Lignin is the third macromolecular component of wood. It consists of an aromatic system formed by units of phenylpropane and coumaric, coniferyl, and sinapyl alcohol [51,53]. Lignin decomposes in broader temperature ranges than the carbohydrate polymers. Figures 1b, 2b and 3b show this signal in black over an ample reaction time that runs from 80 to 150 min. We also found high thermal stability in the woods of these three Fabaceae, comparable to the tendency identified in the wood of *Prosopis laevigata*, which is also a member of this genus [13]. Other studies explain that this behavior is due to the high molecular weight and greater thermal stability that make decomposition very difficult. The thermal degradation of lignin occurs between 200 and 520 °C [19,49,50,54]. Figures 1b, 2b and 3b also show the experimental graph that displays—in blue—the variation in the mass of a sample as the temperature increases, and the variation—in pink—that represents the simulation of those changes. These graphs demonstrate the similarity between the experimental data and the data obtained by TGA with the deconvolution of the DTG derivatives for the woods of the three species of interest.

3.4. Higher Heating Value

Higher heating value is a key parameter of biomass that is to be used as biofuel. HHV utilizes the energy that is freed when water vapor condenses, while the lower heating value does not consider this [55]. Table 3 presents the results for HHV of the woods of these Fabaceae using a bomb calorimeter and mathematical models. As a function of these calculation methods, the chemical composition and proximal analysis of the woods of *A. farnesiana* and *A. pennatula* showed no statistically significant differences ($p \leq 0.05$). The wood of *A. plurijuga*, specifically, did not present any statistically significant differences ($p \leq 0.05$) when the bomb calorimeter was used, or as a function of the calculations of the chemical composition and the proximal analysis. These findings concur with earlier reports that utilized these methods with the wood of *Prosopis laevigata* [10]. It is important to mention that using the calculations as a function of the elemental analysis generated lower values for all three species, as statistically significant differences ($p \leq 0.05$) emerged among the methods. This is also consistent with previous results reached when utilizing the same predictive models with distinct sources of biomass [56].

Table 3. Higher heating value of *A. farnesiana*, *A. pennatula*, and *A. plurijuga* wood.

Calorific Value (MJ/kg)	<i>A. farnesiana</i>	<i>A. pennatula</i>	<i>A. plurijuga</i>
Bomb calorimeter	19.40 ^{B,a} (± 0.42)	18.49 ^{B,b} (± 0.24)	19.61 ^{A,a} (± 0.27)
Chemical composition	20.04 ^{A,b} (± 0.04)	20.25 ^{A,a} (± 0.05)	19.96 ^{A,b} (± 0.05)
Proximal analysis	20.26 ^{A,a} (± 0.01)	19.98 ^{A,b} (± 0.15)	20.24 ^{A,a} (± 0.04)
Elementary analysis	18.00 ^{C,a} (± 0.08)	16.87 ^{C,a} (± 0.39)	17.75 ^{B,a} (± 0.82)

Identical capital letters in a column indicate that there is no statistical difference, and identical lowercase letters in a row indicate that there is no statistical difference. (Tukey, $p = 0.05$).

With respect to the interaction between the obtention methods and the species, we found no statistical differences ($p \leq 0.05$) between *A. farnesiana* and *A. plurijuga* (Table 3). According to these results, in conditions where a bomb calorimeter is not available, the most recommendable model for calculating HHV is as a function of the proximal analysis since this provides immediate results and does not require much time or the use of chemical reagents. In this regard, the results for the HHV of the woods from these three Fabaceae using the bomb calorimeter and mathematical model based on the proximal analysis (Table 3) are within the interval of 19.17–20.3 MJ/kg cited in previous reports that used this equipment to analyze the woods of *A. farnesiana*, *A. pennatula*, and *A. plurijuga* [36,57].

3.5. Elemental and Inorganic Elemental Analyses

3.5.1. Elemental Analysis

Elemental analysis makes it possible to identify aspects of the quality of solid biofuels, such as the fractions of C, H, and O [58]. Some reports affirm that high concentrations of N contribute to the formation of nitrogen oxides (NO_x) and that S promotes the formation of sulfur dioxide (SO₂) [59]. It is also well known that these elements can damage the environment, are harmful for human health, and can deteriorate combustion equipment [60–62]. However, the low percentage of N in the wood of *A. farnesiana*, *A. pennatula*, and *A. plurijuga* documented in this study (Table 4) may have only low negative impacts when this biomass is utilized as solid biofuel, since they are below technical limits ($N \leq 0.5$), according to the standard UNE-EN 14961-1 [63]. Present results are comparable to those of other works conducted with wood from species of Fabaceae: C (45.9–49.5%), H (6.7–7.3%), O (43.2–46.7%), N (0.11–0.41%), and S (0.04–0.14%) [13,36].

Table 4. Organic and inorganic elements of *A. farnesiana*, *A. pennatula*, and *A. plurijuga* wood.

	Element	<i>A. farnesiana</i>	<i>A. pennatula</i>	<i>A. plurijuga</i>
Elementary analysis (%)	C	46.65 (±0.21)	43.76 (±0.18)	45.78 (±1.0)
	H	6.70 (±0.14)	6.89 (±0.29)	6.95 (±0.34)
	O	46.06 (±0.24)	48.95 (±0.32)	46.97 (±1.20)
	N	0.42 (±0.14)	0.31 (±0.14)	0.21 (±0.09)
	S	0.11 (±0.02)	0.07 (±0.006)	0.06 (±0.007)
Ash microanalysis (ppm)	K	105,019.30	150,391.90	150,536.02
	Ca	102,885.96	73,275.93	101,960.59
	P	9238.77	6424.63	4400.24
	Sr	3069.60	2362.51	3245.48
	Na	2449.93	1390.54	8202.02
	Mg	1140.72	578.96	1436.26
	S	2017.05	836.61	966.02
	Ba	280.89	160.12	105.75
	Li	122.19	63.18	155.30
	Fe	112.84	103.61	195.65
	B	86.40	43.02	240.56
	Si	52.48	25.80	158.15
	Al	41.47	28.79	72.82
	Cu	41.71	26.58	41.57
	Mn	24.82	19.41	20.91
	Zn	15.13	13.31	14.34
	Ni	1.05	5.47	<0.05
	Cr	<0.05	0.54	<0.05

3.5.2. Microanalysis of Ash

Table 4 lists the 18 inorganic elements identified in the ash of the wood of *A. farnesiana*, *A. pennatula*, and *A. plurijuga*. The most abundant substances are K, Ca, P, Sr, Na, and Mg. The ash of woods from other Fabaceae species and other broadleaf species collected

in the same zone is similarly rich in these elements [4,13,50]. International standards for solid biofuels [64] estimate the following limiting values for the woods of broadleaf species: K = 1500–500 ppm; Ca = 20,000–800; P = 200–50 ppm; and Mg = 400–100 ppm. Clearly, our results are higher than the standard values consulted. On this point, it is widely recognized that the constitution of the minerals in ash can vary due to such factors as the availability of minerals in the soil where the trees grow [65]. According to the literature consulted, the inorganic elements identified in ash can have positive or negative effects. While the elements Ca, Mg, and P may favor the use of this biomass as bioenergy by improving the fusion point of ash, retaining contaminants and reducing residues in combustion equipment [66,67], they may have negative effects on combustion processes since elements like Ca, Mg, P, K, Na, and S can cause particle emissions, slag, and corrosion. Similarly, Na, Fe, and Si can lead to incrustations and problems in the fusion of the ash [61,66,67]. For the wood characterized in this study, we found that the presence of Zn is slightly higher than the technical parameter of ≤ 10.0 ppm for solid biofuels (Table 4). In contrast, the proportions of Ni and Cr were both below the ≤ 10.0 ppm cited in the technical recommendation [63].

4. Conclusions

No statistically significant differences ($p \leq 0.05$) were found between the thermogravimetric and chemical methods for the structural constituents—cellulose, lignin—or volatile material in the three species of Fabaceae. This was also true for the wood of *A. pennatula* and *A. plurijuga* for hemicelluloses, extractives, and moisture. In addition, TGA-DTG thermogravimetry made it possible to determine the chemical composition and proximal analysis in less time with minimal use of chemical reagents but with precise results. Regarding HHV, if researchers do not have access to calorimetric equipment, the model recommended for calculating this parameter is as a function of the proximal analysis since this generates immediate results, does not require much time or investment in expensive equipment, and does not occupy chemical reagents. The elemental analysis of the wood of *A. farnesiana*, *A. pennatula*, and *A. plurijuga* generated results below the technical limits ($N \leq 0.5$) for commercialization as solid biofuels. Finally, 18 inorganic elements were found in the ash; most abundantly K, Ca, P, Sr, Na, and Mg.

Author Contributions: Conceptualization, L.F.P.-L., J.J.A.-F., J.G.R.-Q. and J.V.A.-V.; methodology, L.F.P.-L., J.J.A.-F., J.G.R.-Q. and J.V.A.-V.; software, J.J.A.-F.; validation, L.F.P.-L., J.J.A.-F., J.G.R.-Q., R.H.-B., J.V.A.-V., V.M.R.-G. and O.M.-A.; formal analysis, L.F.P.-L., J.J.A.-F., J.G.R.-Q., R.H.-B., J.V.A.-V., V.M.R.-G. and O.M.-A.; investigation, L.F.P.-L., J.J.A.-F., J.G.R.-Q., J.V.A.-V., V.M.R.-G. and O.M.-A.; writing—original draft preparation, L.F.P.-L., J.J.A.-F. and J.G.R.-Q.; writing—review and editing, L.F.P.-L. and J.J.A.-F.; visualization, R.H.-B., J.V.A.-V., V.M.R.-G. and O.M.-A.; supervision, J.J.A.-F. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: The original contributions presented in this study are included in the article. Further inquiries can be directed to the corresponding authors.

Acknowledgments: The author Luis Fernando Pintor Ibarra thanks Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) for the financial support provided during his studies in the *Doctorado en Ciencias y Tecnología de la Madera* program at the UMSNH. The authors thank the coordination of scientific research (CIC) program for supporting this research through the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. The authors thank the Vega-Izquierdo and Pintor-González families for donating the samples.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Rego, F.; Dias, A.P.S.; Casquilho, M.; Rosa, F.C.; Rodrigues, A. Fast determination of lignocellulosic composition of poplar biomass by thermogravimetry. *Biomass Bioenergy* **2019**, *122*, 375–380. [\[CrossRef\]](#)
2. Aniza, R.; Chen, W.H.; Kwon, E.E.; Bach, Q.V.; Hoang, A.T. Lignocellulosic biofuel properties and reactivity analyzed by thermogravimetric analysis (TGA) toward zero carbon scheme: A critical review. *Energy Convers. Manag.* **2024**, *22*, 100538. [\[CrossRef\]](#)
3. Popp, J.; Kovács, S.; Oláh, J.; Divéki, Z.; Balázs, E. Bioeconomy: Biomass and biomass-based energy supply and demand. *New Biotechnol.* **2021**, *60*, 76–84. [\[CrossRef\]](#)
4. Castillo-Tera, O.A.; López-Sosa, L.B.; Pintor-Ibarra, L.F.; Rutiaga-Quiriones, J.G.; Morales-Máximo, M. Evaluation of *Bursera cuneata* Schldl. wood residues for use as densified biofuels. *Results Eng.* **2025**, *26*, 104916. [\[CrossRef\]](#)
5. Rendón Correa, A.; Dorantes Hernández, F.; Mejía Valencia, S.; Alamilla Fonseca, L.N. *Características Macroscópicas, Propiedades y Usos de la Madera de Especies Nativas y Exóticas de México*; Comisión Nacional Para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO): Mexico City, Mexico, 2021.
6. Rico-Arce, M.L.; Gale, S.L.; Maxted, N. A taxonomic study of *Albizia* (Leguminosae: Mimosoideae: Ingeae) in Mexico and Central America. *Ant. Jard. Bot. Madr.* **2008**, *65*, 255–305. [\[CrossRef\]](#)
7. Ramírez-Casillas, R.; López-López, M.C.; Becerra-Aguilar, B.; Dávalos-Olivares, F.; Satyanarayana, K.G. Obtaining dissolving grade cellulose from the huizache (*Acacia farnesiana* L. Willd.) plant. *BioResources* **2019**, *14*, 3301–3318. [\[CrossRef\]](#)
8. Apolinar-Hidalgo, F.; Honorato-Salazar, J.A.; Colotl-Hernández, G. Caracterización energética de la madera de *Acacia pennatula* Schldl. & Cham. y *Trema micrantha* (L.) Blume. *Rev. Mex. Cienc. For.* **2017**, *8*, 71–82. [\[CrossRef\]](#)
9. Pintor-Ibarra, L.F.; Méndez-Zetina, E.D.; Rutiaga-Quiriones, J.G.; Alvarado-Flores, J.J. Capítulo 5: Caracterización proximal de los biocombustibles sólidos. In *Aplicaciones Energéticas de la Biomasa: Perspectivas para la Caracterización Local de Biocombustibles Sólidos*; Universidad Intercultural Indígena de Michoacán: Pátzcuaro, Mexico, 2023; pp. 87–116.
10. Alvarado Flores, J.J.; Alcaraz Vera, J.V.; Ávalos Rodríguez, M.L.; Rutiaga Quiriones, J.G.; Valencia Espino, J.; Guevara Martínez, S.J.; Ríos, E.T.; Zarraga Aguado, R. Kinetic, thermodynamic, FT-IR, and primary constitution analysis of *Sargassum* spp. from Mexico: Potential for hydrogen generation. *Int. J. Hydrogen Energy* **2022**, *47*, 30107–30127. [\[CrossRef\]](#)
11. Agu, O.S.; Tabil, L.G.; Mupondwa, E.; Emadi, B.; Cree, D. Pelletization and quality evaluation of torrefied selected biomass with microwave absorber. *Results Eng.* **2025**, *25*, 104183. [\[CrossRef\]](#)
12. Huang, J.; Chen, Y.; Chen, X.; Jia, D.; Evrendilek, F.; Liu, J. Pyrolytic Valorization of Polygonum multiflorum Residues: Kinetic, Thermodynamic, and Product Distribution Analyses. *Processes* **2025**, *13*, 2701. [\[CrossRef\]](#)
13. Pintor-Ibarra, L.F.; Alvarado-Flores, J.J.; Rutiaga-Quiriones, J.G.; Alcaraz-Vera, J.V.; Ávalos-Rodríguez, M.L.; Moreno-Anguiano, O. Chemical and Energetic Characterization of the Wood of *Prosopis laevis* L.: Chemical and Thermogravimetric Methods. *Molecules* **2024**, *29*, 2587. [\[CrossRef\]](#)
14. Díez, D.; Urueña, A.; Piñero, R.; Barrio, A.; Tamminen, T. Determination of hemicellulose, cellulose, and lignin content in different types of biomasses by thermogravimetric analysis and pseudocomponent kinetic model (TGA-PKM method). *Processes* **2020**, *8*, 1048. [\[CrossRef\]](#)
15. Espinosa-Negrín, A.M.; López-González, L.M.; Casdolo-Gutiérrez, N.L. Pretratamientos aplicados a biomasa lignocelulósicas: Una revisión de los principales métodos analíticos utilizados para su evaluación. *Rev. Cuba. De Química* **2022**, *34*, 87–110.
16. Pettersen, R.C. The chemical composition of wood. *Chem. Solid Wood* **1984**, *207*, 57–126. [\[CrossRef\]](#)
17. Moura, H.O.; Câmara, A.B.F.; Campos, L.M.A.; de Carvalho, L.S. Novel methodology for lignocellulose composition, polymorphism and crystallinity analysis via deconvolution of differential thermogravimetry data. *J. Polym. Environ.* **2023**, *31*, 1915–1924. [\[CrossRef\]](#)
18. Saldarriaga, J.F.; Aguado, R.; Pablos, A.; Amutio, M.; Olazar, M.; Bilbao, J. Fast characterization of biomass fuels by thermogravimetric analysis (TGA). *Fuel* **2015**, *140*, 744–751. [\[CrossRef\]](#)
19. Escalante, J.; Chen, W.H.; Tabatabaei, M.; Hoang, A.T.; Kwon, E.E.; Lin, K.Y.A.; Saravanakumar, A. Pyrolysis of lignocellulosic, algal, plastic, and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of thermogravimetric analysis (TGA) approach. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2022**, *169*, 112914. [\[CrossRef\]](#)
20. TAPPI T264 cm-97; Preparation of Wood for Chemical Analysis. TAPPI Press: Atlanta, GA, USA, 2000.
21. ASTM E11-20; Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2020.
22. ASTM D5142-90; Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures. West Conshohocken: PA, USA, 1998.
23. ASTM D4442-20; Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2020.
24. ASTM D1102-84; Standard Test Method for Ash in Wood. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2013.

25. ASTM E872–82; Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2013.
26. Van Soest, P.V.; Robertson, J.B.; Lewis, B.A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.* **1991**, *74*, 3583–3597. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
27. UNE-EN ISO 18125; Biocombustibles Sólidos. Determinación del Poder Calorífico. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, Spain, 2018.
28. White, R.H. Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of Wood. *Wood Fiber Sci.* **1987**, *19*, 446–452.
29. Cordero, T.; Márquez, F.; Rodríguez-Mirasol, J.; Rodríguez, J.J. Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. *Fuel* **2001**, *80*, 1567–1571. [[CrossRef](#)]
30. Demirbaş, A. Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuel* **1997**, *76*, 431–434. [[CrossRef](#)]
31. Rotz, L.; Giazzi, G. *Characterization of Pharmaceutical Products by the Thermo Scientific FLASH 2000 Elemental Analyzer*; Thermo Fischer Scientific: Milan, Italy, 2012.
32. Ghetti, P.; Ricca, L.; Angelini, L. Thermal analysis of biomass and corresponding pyrolysis products. *Fuel* **1996**, *75*, 565–573. [[CrossRef](#)]
33. Arcibar-Orozco, J.A.; Josue, D.B.; Ríos Hurtado, J.C.; Rangel Méndez, J.R. Influence of iron content, surface area and charge distribution in the arsenic removal by activated carbons. *Chem. Eng. J.* **2014**, *249*, 201–209. [[CrossRef](#)]
34. R Studio. *A Language and Environment for Statistical Computing*; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2020.
35. Kim, H.; Yu, S.; Kim, M.; Ryu, C. Progressive deconvolution of biomass thermogram to derive lignocellulosic composition and pyrolysis kinetics for parallel reaction model. *Energy* **2022**, *254*, 124446. [[CrossRef](#)]
36. Salazar-Herrera, F.; Pintor-Ibarra, L.F.; Musule, R.; Nava-Berumen, C.A.; Alvarado-Flores, J.J.; González-Ortega, N.; Rutiaga-Quinones, J.G. Chemical and energetic properties of seven species of the Fabaceae family. *South-East Eur. For.* **2023**, *14*, 215–224. [[CrossRef](#)]
37. Ruiz-Aquino, F.; Jiménez-Mendoza, M.E.; Santiago-García, W.; Suárez-Mota, M.E.; Aquino-Vásquez, C.; Rutiaga-Quinones, J.G. Energy properties of 22 timber species from Oaxaca, Mexico. *South-East Eur. For.* **2022**, *13*, 107–113. [[CrossRef](#)]
38. Rani, M.S.A.; Mohammad, M.; Sua'it, M.S.; Ahmad, A.; Mohamed, N.S. Novel approach for the utilization of ionic liquid-based cellulose derivative biosourced polymer electrolytes in safe sodium-ion batteries. *Polym. Bull.* **2021**, *78*, 5355–5377. [[CrossRef](#)]
39. Cichosz, S.; Masek, A. Thermal Behavior of Green Cellulose-Filled Thermoplastic Elastomer Polymer Blends. *Molecules* **2020**, *25*, 1279. [[CrossRef](#)]
40. Alonso-Montemayor, F.J.; López-Badillo, C.M.; Aguilar-González, C.N.; Ávalos-Belmontes, F.; Castañeda-Facio, A.O.; Reyna-Martínez, R.; Neira-Velázquez, M.G.; Soria-Argüello, G.; Navarro-Rodríguez, D.; Delgado-Aguilar, M.; et al. Effect of cold air plasmas on the morphology and thermal stability of bleached hemp fibers. *Rev. Mex. De Ing. Química* **2020**, *19* (Suppl. 1), 457–467. [[CrossRef](#)]
41. Somorin, T.; Parker, A.; McAdam, E.; Williams, L.; Tyrrel, S.; Kolios, A.; Jiang, Y. Pyrolysis characteristics and kinetics of human faeces, simulant faeces and wood biomass by thermogravimetry–gas chromatography–mass spectrometry methods. *Energy Rep.* **2020**, *6*, 3230–3239. [[CrossRef](#)]
42. French, A.D. Glucose, not cellobiose, is the repeating unit of cellulose and why that is important. *Cellulose* **2017**, *24*, 4605–4609. [[CrossRef](#)]
43. Seshadri, V.; Westmoreland, P.R. Concerted reactions and mechanism of glucose pyrolysis and implications for cellulose kinetics. *J. Phys. Chem. A* **2012**, *116*, 11997–12013. [[CrossRef](#)]
44. Skreiberg, A.; Skreiberg, Ø.; Sandquist, J.; Sørum, L. TGA and macro-TGA characterisation of biomass fuels and fuel mixtures. *Fuel* **2011**, *90*, 2182–2197. [[CrossRef](#)]
45. Chen, W.H.; Wang, C.W.; Ong, H.C.; Show, P.L.; Hsieh, T.H. Torrefaction, pyrolysis and two-stage thermodegradation of hemicellulose, cellulose and lignin. *Fuel* **2019**, *258*, 116168. [[CrossRef](#)]
46. Ebringerová, A.; Hromádková, Z.; Heinze, T. Hemicellulose. In *Polysaccharides I: Structure, Characterization and Use*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2005; pp. 1–67. [[CrossRef](#)]
47. Sjöström, E. *Wood Chemistry: Fundamentals and Applications*; Academic Press, Inc.: London, UK, 1981; pp. 49–66.
48. Zhou, X.; Li, W.; Mabon, R.; Broadbelt, L.J. A critical review on hemicellulose pyrolysis. *Energy Technol.* **2017**, *5*, 52–79. [[CrossRef](#)]
49. Nurazzi, N.; Asyraf, M.R.M.; Rayung, M.; Norrahim, M.N.F.; Shazleen, S.S.; Rani, M.S.A.; Abdan, K. Thermogravimetric analysis properties of cellulosic natural fiber polymer composites: A review on influence of chemical treatments. *Polymers* **2021**, *13*, 2710. [[CrossRef](#)]
50. Alvarado Flores, J.J.; Pintor Ibarra, L.F.; Mendez Zetina, F.D.; Rutiaga Quinones, J.G.; Alcaraz Vera, J.V.; Ávalos Rodríguez, M.L. Pyrolysis and Physicochemical, Thermokinetic and Thermodynamic Analyses of *Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britt and Baker Waste to Evaluate Its Bioenergy Potential. *Molecules* **2024**, *29*, 4388. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
51. Fengel, D.; Wegener, G. *Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions*; Walter de Gruyter: Berlin, Germany, 2011; pp. 66–222.

52. Poletto, M.; Ornaghi Junior, H.L.; Zattera, A.J. Native cellulose: Structure, characterization and thermal properties. *Materials* **2014**, *7*, 6105–6119. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
53. Chávez-Sifontes, M.; Domine, M.E. Lignin, structure and applications: Depolymerization methods for obtaining aromatic derivatives of industrial interest. *Av. En Cienc. E Ing.* **2013**, *4*, 15–46.
54. Brebu, M.; Vasile, C. Thermal degradation of lignin—A review. *Cellul. Chem. Technol.* **2010**, *44*, 353–363.
55. Carrillo-Parra, A.; Bustamante-García, V.; Ngangyo-Heya, M.; Corral-Rivas, J.J. Capítulo 1. Contenido de humedad y calidad de biocombustibles sólidos. In *Química de Los Materiales Lignoceleulósicos y su Potencial Bioenergético*; Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo: Morelia, México, 2016; pp. 12–28.
56. Rutiaga-Quinones, J.G.; Pintor-Ibarra, L.F.; Orihuela-Equihua, R.; González-Ortega, N.; Ramírez-Ramírez, M.A.; Carrillo-Avila, N.; Carrillo-Parra, A.; Navarrete-García, M.A.; Ruiz-Aquino, F.; Rangel-Méndez, J.R.; et al. Characterization of Mexican waste biomass relative to energy generation. *BioResources* **2020**, *15*, 8529–8553. [[CrossRef](#)]
57. Jiménez-Mendoza, M.E.; Ruiz-Aquino, F.; Aquino-Vásquez, C.; Santiago-García, W.; Santiago-Juárez, W.; Rutiaga-Quinones, J.G. Aprovechamiento de leña en una comunidad de la Sierra Sur de Oaxaca, México. *Rev. Mex. Cienc. For.* **2023**, *14*, 22–49. [[CrossRef](#)]
58. Palamanit, A.; Khongphakdi, P.; Tirawanichakul, Y.; Phusunti, N. Investigation of yields and qualities of pyrolysis products obtained from oil palm biomass using an agitated bed pyrolysis reactor. *Biofuel Res. J.* **2019**, *6*, 1065–1079. [[CrossRef](#)]
59. Ren, X.; Sun, R.; Meng, X.; Vorobiev, N.; Schiemann, M.; Levendis, Y.A. Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass. *Fuel* **2017**, *188*, 310–323. [[CrossRef](#)]
60. ISO 16948; Solid Biofuels—Determination of Total Content of Carbon, Hydrogen and Nitrogen. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2015.
61. ISO 16994; Solid Biofuels—Determination of Total Content of Sulfur and Chlorine. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2016.
62. Endriss, F.; Kuptz, D.; Hartmann, H.; Brauer, S.; Kirchhof, R.; Kappler, A.; Thorwarth, H. Analytical Methods for the Rapid Determination of Solid Biofuel Quality. *Chem. Ing. Tech.* **2023**, *95*, 1503–1525. [[CrossRef](#)]
63. UNE-EN 14961-1; Especificaciones y Clases de Combustibles. Parte 1: Requisitos Generales. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, Spain, 2011.
64. UNE-EN ISO 17225-1; Biocombustibles Sólidos. Especificaciones y Clases de Combustibles. Parte 1: Requisitos Generales. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, Spain, 2020.
65. Pintor-Ibarra, L.F.; Carrillo-Parra, A.; Herrera-Bucio, R.; López-Albarrán, P.; Rutiaga-Quinones, J.G. Physical and chemical properties of timber byproducts from *Pinus leiophylla*, *P. montezumae* and *P. pseudostrobus* for a bioenergetic use. *Wood Res.* **2017**, *62*, 849–861.
66. Obernberger, I.; Thek, G. *The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilisation of Pellets*; Routledge: London, UK, 2010.
67. ISO 16967; Biocombustibles Sólidos—Determinación de Elementos Mayoritarios—Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na y Ti. Beuth Verlag: Berlin, Germany, 2015.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

10. Anexo 2: Artículo de investigación publicado



Article

Chemical and Energetic Characterization of the Wood of *Prosopis laevigata*: Chemical and Thermogravimetric Methods

Luis Fernando Pintor-Ibarra ^{1,*}, José Juan Alvarado-Flores ^{1,*}, José Guadalupe Rutiaga-Quinones ¹, Jorge Víctor Alcaraz-Vera ², María Liliana Ávalos-Rodríguez ³ and Oswaldo Moreno-Anguiano ¹

¹ Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edif. D. Cd. Universitaria, Santiago Tapia No. 403, Centro, Morelia 58000, Mexico; jose.rutiaga@umich.mx (J.G.R.-Q.); 0234033j@umich.mx (O.M.-A.)

² Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edif. D. Cd. Universitaria, Santiago Tapia No. 403, Centro, Morelia 58000, Mexico; jorge.alcaraz@umich.mx

³ Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, Morelia 58190, Mexico; lic.ambientalista@gmail.com

* Correspondence: luis.pintor@umich.mx (L.F.P.-I.); j.alvarado@umich.mx (J.J.A.-F.)



Citation: Pintor-Ibarra, L.F.; Alvarado-Flores, J.J.; Rutiaga-Quinones, J.G.; Alcaraz-Vera, J.V.; Ávalos-Rodríguez, M.L.; Moreno-Anguiano, O. Chemical and Energetic Characterization of the Wood of *Prosopis laevigata*: Chemical and Thermogravimetric Methods. *Molecules* **2024**, *29*, 2587. <https://doi.org/10.3390/molecules29112587>

Academic Editors: Alejandro Rodríguez Pascual, Eduardo Espinosa Victor and Carlos Orestes Martín Medina

Received: 16 April 2024

Revised: 24 May 2024

Accepted: 28 May 2024

Published: 31 May 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Diverse methodologies exist to determine the chemical composition, proximate analysis, and calorific value of biomass. Researchers select and apply a specific methodology according to the lignocellulosic material they study and the budgetary resources available. In this project, we determined the primary chemical constitution and proximate analysis of *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl.) Jonhst wood using a traditional chemical method and a novel procedure based on the deconvolution of the DTG signal produced by TGA. The highest calorific value was verified using a calorimetric pump based on mathematical models. We also conducted elemental analysis and a microanalysis of ash, and applied Fourier transform infrared spectroscopic analysis (FT-IR). The means of the results obtained by the chemical method and TGA-DTG, respectively, were: hemicelluloses 7.36%–(8.72%), cellulose 48.28%–(46.08%), lignin 30.57%–(32.44%), extractables 13.53%–(12.72%), moisture 2.03%–(4.96%), ash 1.77%–(1.90%), volatile matter 75.16%–(74.14%), and fixed carbon 23.05%–(18.93%). The procedure with the calorimetric pump generated a calorific value above 20.16 MJ/kg. The range generated by the various models was 18.23–21.07 MJ/kg. The results of the elemental analysis were: carbon 46.4%, hydrogen 6.79%, oxygen 46.43%, nitrogen 0.3%, and sulfur 0.5%. The microanalysis of ash identified 18 elements. The most abundant ones were potassium > calcium > sodium. Based on the infrared spectrum (FT-IR) of *Prosopis laevigata* wood, we detected the following functional groups: OH, C-H, C=O, CH₂, CH₃, C-O-C, C-OH, and C4-OH. Our conclusion is that the TGA-DTG method made it possible to obtain results in less time with no need for the numerous reagents that chemical procedures require. The calorific value of *P. laevigata* wood is higher than the standards. Finally, according to our results, proximate analysis provides the best model for calculating calorific value.

Keywords: TGA-DTG; biomass; proximate analysis; calorific power; biofuels

1. Introduction

Worldwide, 44 species of the genus *Prosopis* have been registered. The predominant species in Mexico are *P. laevigata* and *P. glandulosa*. In this project, we studied the wood of *P. laevigata*, a species of the Fabaceae family that has a broad, natural distribution in arid and semiarid zones of the country. Estimates indicate that 50% of Mexico's national territory has these types of climates, concentrated in the states of Guanajuato, Hidalgo, Michoacán, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí, and Veracruz [1,2]. *P. laevigata* is a species of great ecological and economic importance. Its wood is commercialized mainly in the manufacture of rustic furniture, artisanal crafts, flooring, railroad ties, moldings, doors,

and windows, as well as charcoal production. The bark is used in tanning, the exudate known as gum arabic is used in cosmetic products, printing, and as a glue for paper, while the leaves and fruits have medicinal applications as antimicrobials and are utilized in cattle feed [3,4]. While information on the uses, diversity, and distribution of this wood is abundant, there are few studies of its chemical constituents and energy properties [5–7]. Given the heterogeneous nature of wood, it is especially important to determine the chemical and energy properties of its lignocellulosic biomass as a possible energy source. A renewable raw material, wood is neutral in terms of emissions and ensures a sustainable supply because the CO₂ it produces is equivalent to the amount of energy retained in the plants [8,9]. Today, bioenergy is the main source of renewable energy, representing around 10% of global energy consumption and 77% of all forms of renewable energy; that is, biofuels and hydroelectric, solar, eolic, and geothermic energy [10]. Determining the chemical and energy properties of this biomass can be achieved using various techniques that evaluate its principal chemical components, but proximate analysis of lignocellulosic materials using routine gravimetric procedures require considerable care and time [9,11]. Other methods include thermogravimetric analysis (TGA) and the deconvolution of the first derivative (DTG), which generate precise quantifications in less time, and can determine the primary constituents of biomass and proximate analysis [12,13]. Few researchers, however, have access to DTG because many laboratories lack the budgetary resources to acquire the equipment used to perform TGA. For this reason, they continue to use classic gravimetric methods for the chemical analysis of biomasses [9,14]. The objective of the present study is to contribute to the development of new methodologies that will improve our knowledge of the chemical and energy properties of *P. laevigata* wood.

2. Results and Discussion

2.1. Primary Constitution of the Wood: Chemical and TGA-DTG Methods

Diverse methodologies are available to determine the primary composition of biomass, but it is well known that each one has certain strengths and weaknesses [9,11]. This study found that statistically significant differences exist ($p \leq 0.05$) between the chemical and thermogravimetric (TGA-DTG) methods for the parameters of the primary constituents—hemicelluloses and lignin—and in a proximate analysis of moisture, volatile matter, and fixed carbon. In contrast, there were no significant differences for cellulose, extractables, and ash (Table 1). The differences encountered are related to the procedure used, since the chemical method makes its determinations individually, while thermogravimetry (TGA-DTG) obtains results through pyrolysis in a controlled system using mathematical calculations, such as multiple linear regression, where the fractions of the main chemical components can be optimized [15]. Independent thermal degradation by pyrolysis of the three principal chemical components of wood (cellulose, hemicelluloses, and lignin) can accurately predict the parameters of deconvolution of the DTG [13,16].

Table 1. Chemical composition and proximate analysis of *P. laevigata* wood by two methods.

Parameter	Chemical Analysis *		TGA-DTG Analysis *	
	Average (%)	SD (±)	Average (%)	SD (±)
Hemicelluloses	7.36	0.15	8.74	0.22
Cellulose	48.28	1.0	46.08	0.25
Lignin	30.57	0.74	32.44	0.40
Extractives	13.53	0.12	12.72	0.73
Moisture	2.03	0.14	4.96	0.11
Ashes	1.77	0.07	1.90	0.01
Volatile material	75.16	0.13	74.14	0.16
Fixed carbon	23.05	0.36	18.93	0.08

* Statistically significant difference ($p \leq 0.05$) between methods. SD: standard deviation.

Our review of other chemical studies of the duramen of *P. laevigata* wood using chemical methods found that published results vary. Carrillo et al. [5], for example, reported the following percentages: hemicelluloses 16%, cellulose 45.7%, lignin 31.4%, and extractables 16%. In contrast, based on a fiber analysis by the Van Soest method [7] published these yields: hemicelluloses 14.09%, cellulose 45.35%, lignin 22.14%, extractables 16.72%, and ash 1.70%. The results of our work are only comparable with respect to cellulose, lignin, and ash, according to these references (Table 1). It is important to emphasize that the relevant literature indicates that the chemical constituents of wood can vary by the material studied (duramen, sapwood, bark), the age of the tree, growth conditions, geographic location, altitude, climatic factors, the chemical solvents utilized, and experimental methodologies, among other factors [17,18].

Through proximate analysis, one can obtain an immediate profile of the quality of solid biofuels, so this is an important approach for commercialization and the design of combustion equipment [19], two parameters that affect the quality of biofuels. For example, high percentages of moisture and ash reduce the calorific value and efficiency of biomasses during combustion [20,21], while high percentages of volatile matter increase yields during the conversion of biomass into biodiesel by pyrolysis and favor the production of biogas and the calorific value in densified biofuels [22,23]. In this regard, high fixed carbon content improves the calorific value of densified biofuels and charcoal [24,25]. Our work did not find any statistically significant differences for ash content (Table 1). The statistically significant differences determined for the other parameters tested in the proximate analysis may be related to the procedures used in distinct methodologies; for example, the fact that in TGA pyrolysis is determined using a sample in a controlled system (Figure 1). However, they may also be attributable to the calculation method applied. In gravimetric methods, these are performed on the basis of biomass that is free of moisture using, for instance, the expression: % fixed carbon = $[100 - (\% \text{ ash} + \% \text{ volatile matter})]$, where adjusting for the moisture in the ash and volatile matter is performed previously. Meanwhile, the TGA method for calculating volatile matter uses the expression: % volatile matter = $[100 - (\% \text{ moisture} + \% \text{ ash} + \% \text{ fixed carbon})]$. Based on these expressions, it is clear that the adaptation of the % of moisture influences results.

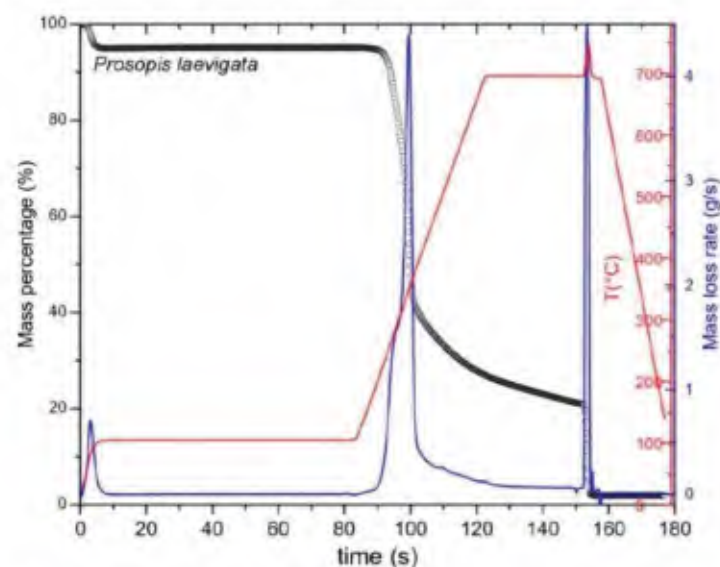


Figure 1. TGA and DTG curves of *P. laevigata* wood.

Because *P. laevigata* wood has an especially high amount of fixed carbon, it is a solid biofuel of good quality. The proximate analysis of the duramen of *P. laevigata* in a study using gravimetric methods obtained the following percentages: ash 1.70%, volatile matter 78.46%, and fixed carbon 19.83% [7]; while in their work, Martínez-Pérez et al. [6] reported 1.24% of ash in the duramen of this species. In comparative terms, only the percentage of ash obtained in these two reports is comparable to the references consulted (Table 1). In general, the results obtained with the two methods applied in our work are within the ranges reported for woods of latifoliate species: ash 0.49–4.51%, volatile matter 76.60–94.70%, and fixed carbon 9.32–21.27% [26,27].

2.2. Thermal Decomposition Process (TGA) and Deconvoluted (DTG)

In the first stage of the pyrolysis process of *P. laevigata* wood, conducted in the temperature range of 25–100 °C for a period of 80 min, a loss of moisture from the biomass occurred (Figure 1). Some studies have reported that this temperature causes the volatilization of the organic fraction of low molecular weight biomass, including some extractable substances [28].

In the second stage, when the temperature was increased from 100 to 700 °C for 30 min, we obtained the calculation of the fixed carbon content from the proximate analysis. This stage included the thermal decomposition of the hemicelluloses and cellulose. It is estimated that the loss of mass of these polymers occurs in a temperature range of 200–675 °C [29,30]. Another characteristic of this stage is a greater loss of the wood fraction. As Figure 1 shows, DTG indicates the degradation velocity of the mass (in blue). It is well known that wood is made up mainly of these polysaccharides, with estimated fractions as high as 70% [18,31]. Table 1 shows the percentages of these chemical constituents. Figure 2 presents the deconvolution of the DTG, where the orange color represents the primary component with lower thermal stability due to the presence of acetyl groups that correspond to the hemicelluloses. Other researchers have reported this tendency [12,15] in other lignocellulosic materials. The curve of greater size—in green—represents cellulose. This second polymer presents higher thermal resistance than the hemicelluloses due to its crystalline structure [32,33].

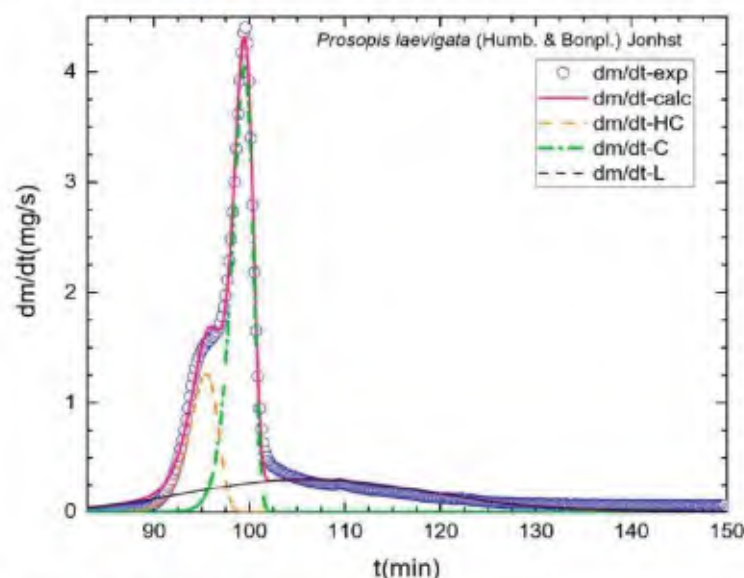


Figure 2. Deconvoluted DTG curve of *P. laevigata* wood.

This illustration includes a curve—in black—that corresponds to lignin, which began a reaction at low temperatures that persisted across a broad temperature range. This phenomenon is associated with the diverse functional groups in its structure, which vary in terms of thermal stability [34]. Reports in the literature include antecedents of this phenomenon of thermal degradation in some latifoliate species [12,32]. Figure 2 also shows the experimental graph—in blue—with calculations in pink. The similarity between them is evident, leading to the conclusion that they are correct. In the third stage (Figure 1), a peak was registered at an approximate time of 155 min. This corresponded to the influx of oxygen that was applied at 700 °C to eliminate all organic matter. Finally, the last fraction, consisting of the remaining residue, corresponds to the inorganic fraction made up of ash, which was obtained at the end of the cooling process from 700–25 °C in a time of 20 min.

2.3. Higher Heating Value (HHV)

The calorific value is the amount of energy per unit of mass or volume that is released in a complete combustion [35]. It is the most important parameter for characterizing materials used as fuels. The calorific value of wood depends on its chemical components. Some authors mention that lignin favors the calorific value of solid biofuels [36,37], though other studies have concluded that extractables increase calorific value, especially in species of *Pinus* spp. [38,39], while others report this same effect [40]. Our study did not identify any statistically significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$) in the calorific value higher than—using a calorimetric pump—between the predictive mathematical models based on chemical composition and the proximate analysis (Table 2). We did, however, find that the model based on elemental analysis generated a lower value and presented statistically significant differences ($p \leq 0.05$) with respect to both the standard methodology and the other predictive models. These results are consistent with those reported in published studies that utilized the same models [26].

According to the results of the present study, the best model for predicting calorific value is proximate analysis, since there were no statistically significant differences between this model and the procedure that involved the use of the calorimetric pump. Moreover, this can be calculated by immediate analyses that do not require chemical reagents or large investments in expensive equipment. This concurs with reports by Rodríguez-Romero et al. [14]. Martínez-Pérez et al. [6], meanwhile, reported a lower calorific value of 18.31 MJ/kg in *P. laevigata* wood based on the approach using a calorimetric pump. They also obtained a larger interval (18.4–19.2 MJ/kg) than the one registered for latifoliate woods in UNE-EN ISO 17225-1 [41]. It is important to emphasize that the results for the caloric value obtained herein with the methodologies utilized are within the interval of 18.13–21.7 MJ/kg estimated for various species of latifoliate woods in Mexico [27,42]. According to international parameters (Table 3), the calorific value higher than of *P. laevigata* wood is above the quality parameter.

Table 2. Calculation of the higher calorific value (MJ/kg) of *P. laevigata* wood.

HHV using calorimetric pump [43]	20.16 (± 0.25) a
HHV = 17.9017 + 0.07444 (L) + 0.0661 (E) [44]	21.07 (± 0.06) a
HHV = 354.3 (FC) + 170.8 (VM) [45]	21.06 (± 0.07) a
HHV = 0.335 (C) + 1.423 (H) − 0.154 (O) − 0.145 (N) [46]	18.23 (± 0.92) b

Different letters in the column indicate that there is a significant Tukey statistical difference ($p \leq 0.05$). Where: L = lignin, E = Extractives, FC = Fixed carbon, VM = Volatile material, C = carbono, H = Hydrogen, O = Oxygen, N = Nitrogen.

Table 3. Energetic properties, elemental analysis and microanalysis of ashes from *P. laevigata*.

Parameter	Magnitude	Calculated Value	Technical Parameters Limit [47]	Typical Variation for Hardwood Woods [41]
<i>Energetic properties</i>				
Moisture	%	7.36 (± 0.15)	≤ 10	NS
Ashes	%	1.77 (± 0.07)	≤ 1.5	0.2–1.0
Calorific value	MJ/kg	20.1 (± 0.25)	16.3–19	18.4–19.2
<i>Elementary analysis</i>				
Carbon	%	46.4 (± 0.42)	–	48–52
Hydrogen	%	6.79 (± 0.15)	–	5.9–6.5
Oxygen	%	46.43 (± 0.38)	–	41–45
Nitrogen	%	0.3 (± 0.12)	≤ 0.5	< 0.1–0.5
Sulfur	%	0.05 (± 0.01)	<0.03	<0.01–0.05
<i>Ash microanalysis (parts per million, ppm)</i>				
K	mg/kg	182,962.57	–	500–1500
Ca	mg/kg	122,616.47	–	800–20000
Na	mg/kg	11,042.69	–	10–200
Sr	mg/kg	3174.39	–	NS
S	mg/kg	1265.70	–	NS
Mg	mg/kg	972.01	–	100–400
P	mg/kg	649.19	–	50–200
Ba	mg/kg	106.76	–	NS
B	mg/kg	84.35	–	NS
Si	mg/kg	69.56	–	100–200
Fe	mg/kg	53.47	–	10–100
Cu	mg/kg	44.28	–	0.5–10
Al	mg/kg	35.98	–	<10–50
Li	mg/kg	32.40	–	NS
Mn	mg/kg	23.72	–	83
Zn	mg/kg	16.37	≤ 10.0	5–100
Ni	mg/kg	7.70	≤ 10.0	<0.1–10
Cr	mg/kg	4.48	≤ 10.0	0.2–10

NS = not specified.

2.4. Elemental Analysis

The elemental analysis of biomass is another important parameter since it can define the exact atomic elements that make up wood; namely, carbon, hydrogen, nitrogen, and sulfur. Criteria for the quality of biofuels registered in the literature include high percentages of C and O in biomass, as this favors calorific value [48,49]. This affirmation must be qualified; however, because Ali et al. [50] reported that lignocellulosic materials with high O content can corrode combustion equipment. Hydrogen, in contrast, has been found to contribute positively to calorific value, though its proportion in biomass is lower than that of C [48]. Studies also estimate that high amounts of N and S in biomass are the main causes of environmental impacts that can damage human health and lead to the formation of incrustations in combustion equipment [51]. Table 3 presents the results of our elemental analysis of *P. laevigata* wood, which determined a low proportion of C, while H and O were above the ranges reported in the literature for latifoliate woods: respectively, % C: 49.13–50.63, % H: 5.96–6.21, and % O: 43.62–44.49, compared to Rutiaga-Quiñones et al. [43]. Based on norm UNE-EN14961-1 [47] for solid biofuels, N complies with this parameter, but S is slightly above the limit and is comparable to the range estimated for woods of latifoliate species (Table 3).

2.5. Microanalysis of Ash

This analysis was performed to identify the inorganic fraction of the biomass, which consists of the minerals present in the soils where the trees grew. Although these exist in low proportions in wood, they can have negative effects on combustion. For example, Ca, K, P, and Mg can produce slag, corrosion, and fine particle emissions, and form incrustations in combustion equipment [52,53]. Na, Fe, and Si can cause problems like ash fusion, incrustations, and corrosion [54]. We identified 18 elements in our samples (Table 3). The most abundant ones were $K > Ca > Na$. Published studies have reported that Ca, K, P, and Mg are the most abundant chemical elements in wood ash [26,39]. This is consistent with our identifications. Sjöström [17] mentions that B, Cu, Mn, Si, and Zn can be found in lower proportions, and, in effect, we detected these elements. In relation to the elemental ranges of solid biofuels listed in norm UNE-EN 14961-1 [47], *P. laevigata* wood exceeds the ≤ 10.0 mg/kg of Zn. In contrast, Ni and Cr concentrations were below reported levels (Table 3). Other microanalyses of the wood ash of *P. laevigata* have also detected the presence of Ca, K, Mg, P, Si, and Al [6].

2.6. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

Figure 3 shows the infrared spectrum (FT-IR) of *P. laevigata* wood. We identified the OH group in the $3700\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ region. This functional group has also been reported for *P. juliflora* wood from our study area [55]. Published reports suggest that this functional group corresponds to the water molecules that constitute the biomass. However, it is important to note that significant broadening of this band indicates the presence of numerous hydrogen bonds. The existence of adsorbed water molecules or crystallization may be considered less important. This has been reported for other latifoliate woods at 3423 cm^{-1} . These stretching vibrations are related to the cellulose and hemicellulose polymers [56] in the absorption band of the $3000\text{--}2750\text{ cm}^{-1}$ region. We also identified the functional group CH and, as with other species of this genus, there was an absorption band in the $2980\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$ region in *P. juliflora* wood [55]. According to the literature, absorption bands in this region are related to the CH group present in the structural components of wood (cellulose, hemicelluloses, lignin). The CH functional group has been found in other studies of latifoliate species, in the region of 2933 cm^{-1} [57,58]. The peak found between wave numbers $1800\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ is related to the C=O stretching vibrations of carboxylic acid and/or carbonyl (aldehydes, ketones, and esters) [59]. This result is comparable to other studies of latifoliate woods that report the presence of this functional group between 1740 and 1730 cm^{-1} . It is important to note that this functional group has been assigned to the hemicelluloses [58,60].

Turning to the carbonyl functional group, it was identified at an absorption of 1695 cm^{-1} in extracts isolated with acetone, and in aromatic substances between 1615 and 1520 cm^{-1} in extractable substances obtained with methanol and water in *P. kuntzei* wood. Other published reports affirm that these low molecular weight organic compounds are often present in derivatives of gum arabic, mainly in species of the genus *Prosopis* [61]. The position of the absorption bands between 1510 and 1260 cm^{-1} is associated with the functional groups CH_2 and CH_3 , which correspond to the FT-IR spectrum of this wood. The CH_2 group has also been identified in *P. juliflora* wood [55]. These functional groups are associated with cellulose and lignin [58,62]. Other studies have detected them in latifoliate species in the region of $1464\text{--}1375\text{ cm}^{-1}$ [59,63]. Finally, the functional groups C-O-C, C-OH, and C4-OH were identified in vibrations at 1234 , 1160 , and 1028 cm^{-1} , respectively, and β -glucopyranose was found in the cellulose [64]. Similar values have been reported for other latifoliate species, including beech [65].

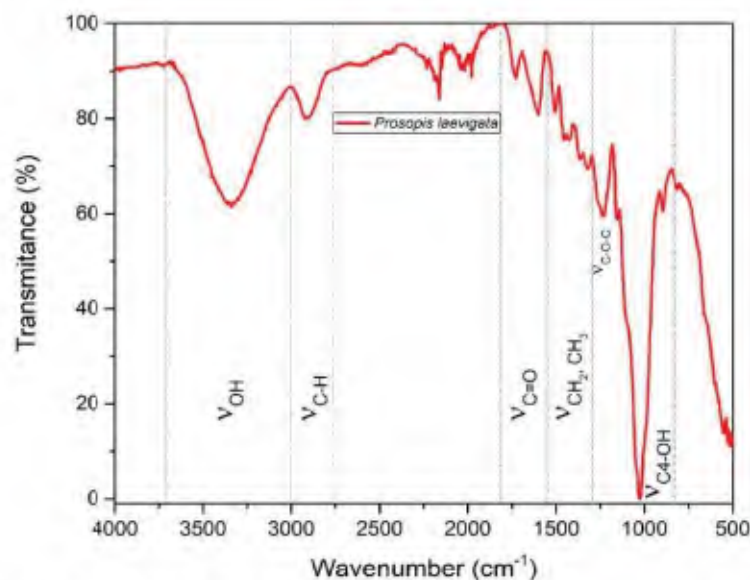


Figure 3. FT-IR infrared spectrum of *P. laevigata* wood.

3. Materials and Methods

3.1. Collection and Preparation of the Study Material

Samples of *P. laevigata* wood were collected in the Lake Cuitzeo Basin in the State of Michoacán, Mexico, between parallels 19°58'51" N 101°7'15" O and 19°58'21" N 101°7'28" O. They were taken from three individual trees of this species in 10-cm slices, cut at a height of 1.30 m (diameter at the height of the chest). The wood was separated from the bark, splintered manually, and left to dry in the shade until it reached a moisture equilibrium (approximately 12%). After drying, the splinters were ground in a conventional grinder, and then sieved in a RO-TAP device (Model RX-29, W.S. Tyler, Mentor, OH, USA) using standard meshes, as follows [66]: numbers 20, 40, and 60, and the #40 flour mesh (425 µm), in accordance with norm T 264 cm-97 [67]. The higher heating value (HHV) was utilized for the chemical, thermogravimetric (TGA), proximate analysis, elemental, and calorific analyses.

3.2. Primary Constitution and Proximate Analysis by Chemical Methods

3.2.1. Primary Analysis by the Chemical Method

Chemical characterization was conducted in an Ankom Model A200 fiber analyzer (ANKOM Technology, Macedon, NY, USA) following the methodology in Van Soest et al. [68]. Gravimetric calculations were performed to obtain the percentages of neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), insoluble lignin (IL), and ash, based on Equations (1)–(4), as reported by Torres et al. [69].

$$\% \text{Extractives} = 100 - \% \text{NDF} \quad (1)$$

$$\% \text{Hemicelluloses} = \% \text{NDF} - \% \text{ADF} \quad (2)$$

$$\% \text{Cellulose} = \% \text{ADF} - \% \text{IL} \quad (3)$$

$$\% \text{Lignin} = \% \text{IL} - \% \text{Ash} \quad (4)$$

3.2.2. Proximate Analysis by Gravimetric Methods

The percentage of moisture was determined using a thermobalance (Benetech Inc., model Gm640, Aurora, IL, USA), according to norm ASTM D4442-20 [70]. The percentage of ash was measured according to norm ASTM D1102-84 [71], while volatile matter content was verified based on norm ASTM E872-82 [72]. Fixed carbon was calculated as the following difference: % fixed carbon = $[100 - (\% \text{ ash} + \% \text{ volatile matter})]$, based on calculations reported previously by Ngangyo-Heya et al. [73].

3.3. Thermogravimetric (TGA) and Differential (DTG) Analyses

For the purposes of this study, a rapid methodology that integrated TGA-DTG analysis was applied using a PerkinElmer STA 6000 thermogravimetric analyzer (Pyris™ software, Version 11, PerkinElmer, Waltham, MA, USA), based on the parameters of the ASTM D5142-90 standard [74]. This analyzer has an alumina crucible that was filled with an amount of 30 ± 10 mg. The sample was distributed uniformly inside the crucible. The analysis was carried out in an inert atmosphere that required a flow of nitrogen gas (N_2) that was 99.99% pure. Before each experiment, the equipment was purged with N_2 for 15 min to eliminate, insofar as possible, the air inside the chamber where pyrolysis was conducted.

3.3.1. Proximate Analysis by TGA

The heating ramp was programmed in four stages. Stage (1): initial heating from 25 to 105 °C. This temperature was maintained for 80 min. The heating velocity was 30 °C/min, in a nitrogen atmosphere at a flow rate of 30 mL/min. Stage (2): temperature was increased to 700 °C at a rate of 15 °C/min, then maintained for 30 min under the same nitrogen flow. Stage (3): oxygen (O_2) was introduced at a flow rate of 30 mL/min. The temperature was kept at 700 °C for 5 min. Stage (4): a switch was made back to nitrogen. Cooling from 700 to 25 °C was performed at a velocity of 30 °C/min. In this final stage, the nitrogen flow was reduced to 15 mL/min.

3.3.2. Primary Constitution: Deconvolution of the DTG

Based on the algorithm developed and data from the TGA analysis, the fractions of the structural components of the wood (cellulose, hemicelluloses, lignin) were calculated utilizing the deconvolution of the curve of the TGA derivative that corresponded to the DTG analysis. The algorithm allowed us to determine the fractions of the structural components as a function of the loss of mass in the sample.

The graphs of the curves were created based on the specific algorithm written in the SciLab platform, which utilizes the ODE (ordinary differential equations) subroutine based on the Adams method (for non-rigid ODE problems). This approach integrates ordinary differential equations to describe the loss of weight associated with the degradation of hemicellulose, cellulose, and lignin, and the *Fminsearch* subroutine (based on Nelder and Mead's algorithm) to optimize the kinetic parameters and achieve the best adjustment of the experimental results [12]. Extractable substances were calculated as the following difference: % extractables = $100 - (\% \text{ cellulose} + \% \text{ hemicelluloses} + \% \text{ lignin} + \% \text{ ash})$.

3.4. Calorific Value Higher Than (HHV)

The calorific value was determined in a calorimetric pump (LECO AC 600, LECCO Corporation, St. Joseph, MI, USA) following norm UNE-EN ISO 18125 [43]. The calorimeter was calibrated with benzoic acid before initiating the analysis. HHV was calculated using mathematical models according to the chemical composition (lignin and extractables), following White [44] and incorporating the results of the proximate analysis as a function of the fixed carbon and volatile matter. This procedure followed Cordero et al. [45] and employed the mathematical model that resulted from the elemental analysis [46].

3.5. Elemental Analysis

Carbon, hydrogen, nitrogen, and sulfur content were determined in a Perkin-Elmer, model 2400 CHNS-Or apparatus, using the modified Dumas method [75]. Sulfur content was calculated by the turbidimetric method with gum arabic. Oxygen content was calculated by difference, based on the reports by Ghetti et al. [76].

3.6. Microanalysis of Ash

Identification of the inorganic elements in the ash was conducted by means of inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES) (VARIAN 730-ES, Varian Inc., (Agilent), Mulgrave, Australia), under the operating conditions reported by Arcibar-Orozco et al. [77].

3.7. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

The functional groups of *P. laevigata* wood were obtained by FT-IR in a Perkin Elmer ATR model 400 spectrometer. The spectra were determined in 16 scans per sample in a range of 4000–500 cm^{-1} at a resolution of 4 cm^{-1} , according to the operating conditions reported by our research team in previous studies [15].

3.8. Statistical Analyses

The analyses of the primary constituents and the proximate analysis by the chemical method and thermogravimetry (TGA-DTG) were performed in triplicate. A student's t-test was used to compare the two treatments for each variable of the basic chemical composition and proximate analysis. For calorific value, an analysis of variance (ANOVA) ($p \leq 0.05$) was applied with a comparison of means using the Tukey test. All statistical analyses were performed with the R Studio program [78]. For the elemental analysis, we report the means and their standard deviation. The microanalysis of ash and spectroscopy (FT-IR) was carried out only once.

4. Conclusions

The novel TGA-DTG thermogravimetric method tested in this study can obtain results for the principal chemical components of wood and for proximate analysis in less time, once the algorithm has been obtained, with no need for numerous chemical reagents compared to traditional chemical procedures. We found statistically significant differences ($p \leq 0.05$) between these two methods in some parameters, but both approaches yielded results comparable to reports in the literature. The calorific value of *P. laevigata* wood is higher than international standards for solid biofuels. According to our results, the best model for calculating calorific value is the one obtained through proximate analysis, as this showed no statistically significant differences ($p \leq 0.05$) with studies that used a calorimetric pump. This method has two advantages: (i) it generates results immediately because no chemical reagents are required, and (ii) it does not require costly equipment. Regarding the elemental analysis, *P. laevigata* wood complies with the limit on nitrogen content for commercialization, while sulfur content was only slightly above the corresponding specification. The microanalysis of ash identified 18 elements, the most abundant ones being potassium > calcium > sodium. According to technical parameters, nickel and chrome concentrations comply with international allowances. Finally, the FT-IR analysis detected eight functional groups: OH, C-H, C=O, CH₂, CH₃, C-O-C, C-OH, and C4-OH.

Author Contributions: Conceptualization, J.J.A.-F., J.V.A.-V., L.F.P.-I. and O.M.-A.; methodology, J.J.A.-F., J.V.A.-V., L.F.P.-I. and J.G.R.-Q.; software, L.F.P.-I. and J.J.A.-F.; validation, J.J.A.-F., J.V.A.-V., M.L.Á.-R. and L.F.P.-I.; formal analysis, L.F.P.-I., J.J.A.-F. and J.V.A.-V.; investigation, J.J.A.-F., L.F.P.-I., J.V.A.-V., M.L.Á.-R. and J.G.R.-Q.; resources, J.J.A.-F., J.V.A.-V., M.L.Á.-R., L.F.P.-I., J.G.R.-Q. and O.M.-A.; data curation, J.J.A.-F., J.V.A.-V., M.L.Á.-R. and O.M.-A.; writing—original draft preparation, L.F.P.-I. and J.J.A.-F.; writing—review and editing, J.J.A.-F., J.V.A.-V., M.L.Á.-R., L.F.P.-I., J.G.R.-Q. and O.M.-A.; visualization, L.F.P.-I. and J.J.A.-F.; supervision, J.J.A.-F., L.F.P.-I., J.V.A.-V., M.L.Á.-R., J.G.R.-Q.; project administration, L.F.P.-I., J.J.A.-F., J.G.R.-Q. and J.V.A.-V.; funding acquisition, J.J.A.-F.,

L.F.P.-I., J.V.A.-V., M.L.Á.-R. and O.M.-A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The authors thank the Coordination of Scientific Investigation of the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) for financing project JGRQ-CIC-UMSNH-2023. The author L.F.P.-I. adds his thanks to CONAHACYT 1621400 scholarship number for the funding provided during his studies in the Doctoral program in the Science and Technology of Wood, also at the UMSNH.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: All data supporting the reported results are available on request from the corresponding author.

Acknowledgments: The authors also thank the Gaspar-Arévalo, Vega-Izquierdo, and Pintor-González families for donating the samples, and José Alberto Soria González for his technical support.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

- Garatuza-Payan, J.; Argente-Martínez, L.; Yépez, E.A.; Arredondo, T. Initial response of phenology and yield components of wheat (*Triticum durum* L.; CIRNO C2008) under experimental warming field conditions in the Yaqui Valley. *Peer J.* **2018**, *6*, e5064. [CrossRef] [PubMed]
- Romero, A.P.; Muñoz, E.J.; Laguna, R.R.; Zárate, R.R. Distribución potencial de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd.) MC Johnst. en el estado de Hidalgo, México. *Rev. Mex. Cienc. For.* **2021**, *12*, 71–87. [CrossRef]
- Saucedo, J.C.R.; Caciato, R.T.; Nuñez, L.M.V.; Pérez, G.S.; Serna, R.R. Importancia de las Poblaciones de Mezquite en el Norte-Centro de México; CENID-RASPA, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias: Durango, México, 2011; pp. 1–21.
- Rodríguez-Sauceda, E.N.; Argente-Martínez, L.; Morales-Coronado, D. Water regime and gas exchange of *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M. C. Johnst. in two semi-arid ecosystems in southern Sonora. *Rev. Chapingo Ser. Cienc. For. Y Ambiente* **2019**, *25*, 107–121. [CrossRef]
- Carrillo, A.; Mayer, L.; Koch, G.; Hapla, F. Wood anatomical characteristics and chemical composition of *Prosopis laevigata* grown in the Northeast of Mexico. *IAWA J.* **2008**, *29*, 25–34. [CrossRef]
- Martínez-Pérez, R.; Pedraza-Bucio, F.E.; Orihuela-Equihua, R.; López-Albarrán, P.; Rutiaza-Quinones, J.G. Calorific value and inorganic material of ten Mexican wood species. *Wood Res.* **2015**, *60*, 281–292.
- Salazar-Herrera, F.; Pintor-Ibarra, L.F.; Musule, R.; Nava-Berumen, C.A.; Alvarado-Flores, J.J.; González-Ortega, N.; Rutiaza-Quinones, J.G. Chemical and Energetic Properties of Seven Species of the Fabaceae Family. *South-East Eur. For.* **2023**, *14*, 215–224. [CrossRef]
- Quinones-Reveles, M.A.; Ruiz-García, V.M.; Ramos-Vargas, S.; Vargas-Larreta, B.; Masera-Cerutti, O.; Ngangyo-Heya, M.; Carrillo-Parra, A. Assessment of pellets from three forest species: From raw material to end use. *Forests* **2021**, *12*, 447. [CrossRef]
- Espinosa-Negrín, A.M.; López-González, L.M.; Casdolo-Gutiérrez, N.L. Pretratamientos aplicados a biomasa lignocelulósica: Una revisión de los principales métodos analíticos utilizados para su evaluación. *Rev. Cuba. Quím.* **2022**, *34*, 87–110.
- Masera, O.; Sacramento Rivero, J.C. Promoting a sustainable energy transition in Mexico: The role of solid biofuels. *BioEnergy Res.* **2022**, *15*, 1691–1693. [CrossRef]
- Segura, F.; Echeverri, R.; Patiño LI, A.C.; Mejía, A.I. Descripción y discusión acerca de los métodos de análisis de fibray of the valor nutricional de forrajes y alimentos para animales. *Vitae* **2007**, *14*, 72–81.
- Saldarriaga, J.F.; Aguado, R.; Pablos, A.; Amutio, M.; Olazar, M.; Bilbao, J. Fast characterization of biomass fuels by thermogravimetric analysis (TGA). *Fuel* **2015**, *140*, 744–751. [CrossRef]
- Rego, F.; Dias, A.P.S.; Casquilho, M.; Rosa, F.C.; Rodrigues, A. Fast determination of lignocellulosic composition of poplar biomass by thermogravimetry. *Biomass Bioenergy* **2019**, *122*, 375–380. [CrossRef]
- Rodríguez-Romero, L.A.; Gutiérrez-Antonio, C.; García-Trejo, J.F.; Feregrino-Pérez, A.A. Estudio comparativo de modelos matemáticos para predecir el poder calorífico de residuos agrícolas mexicanos. *Tecnología* **2022**, *25*, e2142. [CrossRef]
- Flores, J.J.A.; Vera, J.V.A.; Rodríguez, M.L.Á.; Quinones, J.G.R.; Espino, J.V.; Martínez, S.J.G.; Rios, E.T.; Aguado, R.Z. Kinetic, thermodynamic, FT-IR, and primary constitution analysis of *Sargassum* spp. from Mexico: Potential for hydrogen generation. *Int. J. Hydrogen Energy* **2022**, *47*, 30107–30127. [CrossRef]
- Kim, H.; Yu, S.; Kim, M.; Ryu, C. Progressive deconvolution of biomass thermogram to derive lignocellulosic composition and pyrolysis kinetics for parallel reaction model. *Energy* **2022**, *254*, 124446. [CrossRef]
- Sjöström, E. *Wood Chemistry: Fundamentals and Applications*; Academic Press, Inc.: London, UK, 1981; pp. 87–102.
- Fengel, D.; Wegener, G. *Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions*; Walter de Gruyter: Berlin, Germany, 1984; pp. 66–222.
- Pintor-Ibarra, L.F.; Méndez-Zetina, F.D.; Rutiaza-Quinones, J.G.; Alvarado-Flores, J.J. Capítulo 5: Caracterización proximal de los biocombustibles sólidos. In *Aplicaciones Energéticas de la Biomasa: Perspectivas para la Caracterización Local de Biocombustibles Sólidos*; Universidad Intercultural Indígena de Michoacán: Pátzcuaro, México, 2023; pp. 87–116.

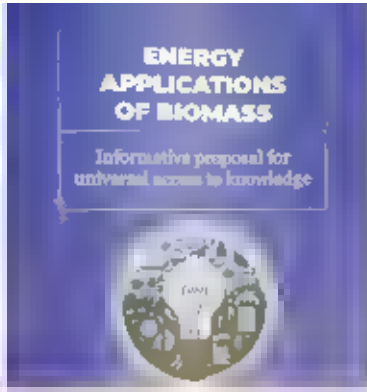
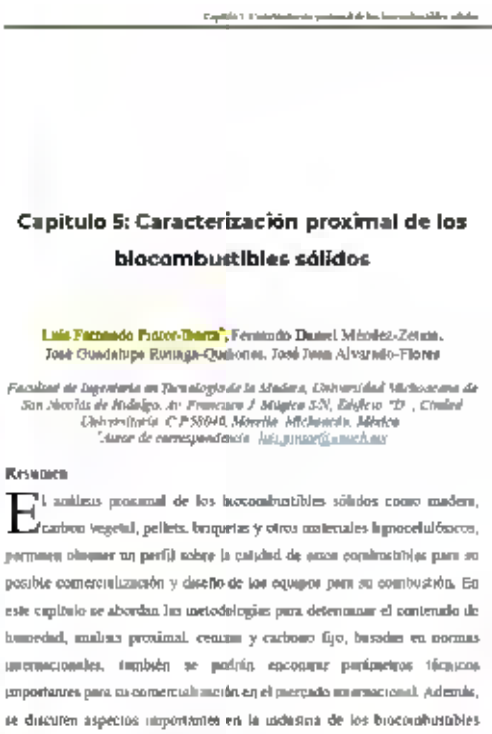
20. Pintor-Ibarra, L.F.; Carrillo-Parra, A.; Herrera-Bucio, R.; López-Albarrán, P.; Rutiaga-Quíñones, J.G. Physical and chemical properties of timber byproducts from *Pinus leiophylla*, *P. montezumae* and *P. pseudostrobus* for a bioenergetic use. *Wood Res.* **2017**, *62*, 849–861.
21. Martínez-Gómez, O.; Pintor-Ibarra, L.F.; Rutiaga-Quíñones, J.G.; Corona-Terán, J. Chemical Composition and Energy Evaluation of *Abies* spp. and *Pinus* spp. Sawdust Collected as a Byproduct of the Primary Wood Sawing. *South-East Eur. For.* **2022**, *13*, 89–96. [CrossRef]
22. Carrillo-Parra, A.; Ngangyo-Heya, M.; Colín-Urieta, S.; Foroughbakhch Poumavab, R.; Rutiaga-Quíñones, J.G.; Correa-Méndez, F. Physical, mechanical and energy characterization of wood pellets obtained from three common tropical species. *Peer J.* **2018**, *6*, e5504. [CrossRef]
23. López-Sosa, L.B.; Alvarado-Flores, J.J.; Corral-Huacuz, J.C.; Aguilera-Mandujano, A.; Rodríguez-Martínez, R.E.; Guevara-Martínez, S.J.; Alcaraz-Vera, J.V.; Rutiaga-Quíñones, J.G.; Zárate-Medina, J.; Ávalos-Rodríguez, M.L.; et al. A prospective study of the exploitation of pelagic *Sargassum* spp. as a solid biofuel energy source. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 8706. [CrossRef]
24. Cruz-Montelongo, C.D.L.; Herrera-Gamboa, J.; Ortiz-Sánchez, I.A.; Ríos-Saucedo, J.C.; Rosales-Serna, R.; Carrillo-Parra, A. Caracterización energética de la carbon vegetal producido en el Norte-Centro de México. *Madera Bosques* **2020**, *26*, e2621971. [CrossRef]
25. Ríos-Saucedo, J.C.; Rosales-Serna, R.; Jiménez-Ocampo, R.; Domínguez-Martínez, P.A.; Carrillo-Parra, A.; Valenzuela-Núñez, L.M. Calidad de pellets a partir de biomasa de ocho especies dendroenergéticas de crecimiento rápido. *Agronomía* **2021**, *55*, 557–568.
26. Rutiaga-Quíñones, J.G.; Pintor-Ibarra, L.F.; Orihuela-Equihua, R.; González-Ortega, N.; Ramírez-Ramírez, M.A.; Carrillo-Avila, N.; Carrillo-Parra, A.; Navarrete-García, M.A.; Ruiz-Aquino, F.; Rangel-Méndez, J.R.; et al. Characterization of Mexican waste biomass relative to energy generation. *BioResources* **2020**, *15*, 8529–8553. [CrossRef]
27. Ruiz-Aquino, F.; Jiménez-Mendoza, M.E.; Santiago-García, W.; Suárez-Mota, M.E.; Aquino-Vásquez, C.; Rutiaga-Quíñones, J.G. Energy Properties of 22 Timber Species from Oaxaca, Mexico. *South-East Eur. For.* **2022**, *13*, 107–113. [CrossRef]
28. Ong, H.C.; Chen, W.H.; Singh, Y.; Gan, Y.Y.; Chen, C.Y.; Show, P.L. A state-of-the-art review on thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A TG-FTIR approach. *Energy Convers. Manag.* **2020**, *209*, 112634. [CrossRef]
29. Ma, Z.; Chen, D.; Gu, J.; Bao, B.; Zhang, Q. Determination of pyrolysis characteristics and kinetics of palm kernel shell using TGA-FTIR and model-free integral methods. *Energy Convers. Manag.* **2015**, *89*, 251–259. [CrossRef]
30. Granados, D.A.; Ruiz, R.A.; Vega, L.Y.; Chejne, F. Study of reactivity reduction in sugarcane bagasse as consequence of a torrefaction process. *Energy* **2017**, *139*, 818–827. [CrossRef]
31. Zhang, C.; Ho, S.H.; Chen, W.H.; Xie, Y.; Liu, Z.; Chang, J.S. Torrefaction performance and energy usage of biomass wastes and their correlations with torrefaction severity index. *Appl. Energy* **2018**, *220*, 598–604. [CrossRef]
32. Yang, H.; Yan, R.; Chen, H.; Zheng, C.; Lee, D.H.; Liang, D.T. In-depth investigation of biomass pyrolysis based on three major components: Hemicellulose, cellulose and lignin. *Energy Fuels* **2006**, *20*, 388–393. [CrossRef]
33. Sebío-Puñal, T.; Naya, S.; López-Beceiro, J.; Tarrio-Saavedra, J.; Artiaga, R. Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose, and lignin from five wood species. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2012**, *109*, 1163–1167. [CrossRef]
34. Brebu, M.; Vasile, C. Thermal degradation of lignin—A review. *Cellul. Chem. Technol.* **2010**, *44*, 353.
35. UNE-EN ISO 16559; Biocombustibles Sólidos, Terminología, Definiciones y Descripciones. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, Spain, 2015.
36. Moya, R.; Tenorio, C. Fuelwood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast-growth species in Costa Rica. *Biomass Bioenergy* **2013**, *56*, 14–21. [CrossRef]
37. Varfolomeev, M.A.; Grachev, A.N.; Makarov, A.A.; Zabelkin, S.A.; Emel'yanenko, V.N.; Musin, T.R.; Gerasimov, A.V.; Nurgaliev, D.K. Thermal analysis and calorimetric study of the combustion of hydrolytic wood lignin and products of its pyrolysis. *Chem. Technol. Fuels Oils* **2015**, *51*, 140–145. [CrossRef]
38. Uceda Castillo, M.E. Determinación de la poder calorífico de 20 especies forestales de la Amazonia Peruana. *Rev. For. Perú* **1984**, *12*, 1–15.
39. Ngangyo-Heya, M.; Foroughbakhch-Poumavab, R.; Carrillo-Parra, A.; Rutiaga-Quíñones, J.G.; Zelinski, V.; Pintor-Ibarra, L.F. Calorific value and chemical composition of five Semi-Arid Mexican tree species. *Forests* **2016**, *7*, 58. [CrossRef]
40. Demirbaş, A.; Demirbaş, A.H. Estimating the calorific values of lignocellulosic fuels. *Energy Explor. Exploit.* **2004**, *22*, 135–143. [CrossRef]
41. UNE-EN ISO 17225-1; Biocombustibles Sólidos. Especificaciones y Clases de Combustibles. Parte 1: Requisitos Generales. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, Spain, 2014.
42. Gutiérrez-Acosta, J.M.; Orihuela-Equihua, R.; Pintor-Ibarra, L.F.; González-Ortega, N.; Hernández-Solis, J.J.; Ruiz-Aquino, F.; Navarrete-García, M.A.; Rutiaga-Quíñones, J.G. On the basic chemical composition of selected biomass types from four regions of Mexico, for bioenergetic purposes. *BioResources* **2021**, *16*, 5694–5705. [CrossRef]
43. UNE-EN ISO 18125; Biocombustibles Sólidos. Determinación de la Poder Calorífico. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, Spain, 2018.
44. White, R.H. Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of Wood. *Wood Fiber Sci.* **1987**, *19*, 446–452.
45. Cordero, T.; Márquez, F.; Rodríguez-Mirasol, J.; Rodríguez, J.J. Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. *Fuel* **2001**, *80*, 1567–1571. [CrossRef]
46. Demirbaş, A. Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuel* **1997**, *76*, 431–434. [CrossRef]

47. UNE-EN 14961-1; Especificaciones y Clases de Combustibles. Parte 1: Requisitos Generales. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, Spain, 2011.
48. García, R.; Pizarro, C.; Lavín, A.G.; Bueno, J.L. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresour. Technol.* **2012**, *103*, 249–258. [\[CrossRef\]](#)
49. Palamanit, A.; Khongphakdi, P.; Tirawanichakul, Y.; Phusunti, N. Investigation of yields and qualities of pyrolysis products obtained from oil palm biomass using an agitated bed pyrolysis reactor. *Biofuel Res. J.* **2019**, *6*, 1065–1079. [\[CrossRef\]](#)
50. Ali, L.; Ahmed Baloch, K.; Palamanit, A.; Raza, S.A.; Laohaprapanon, S.; Techato, K. Physicochemical Characterisation and the Prospects of Biofuel Production from Rubberwood Sawdust and Sewage Sludge. *Sustainability* **2021**, *13*, 5942. [\[CrossRef\]](#)
51. Obernberger, I.; Brunner, T.; Bämthaler, G. Chemical properties of solid biofuels-significance and impact. *Biomass Bioenergy* **2006**, *30*, 973–982. [\[CrossRef\]](#)
52. Obernberger, I.; Thek, G. *The Pellet Handbook*, 1st ed.; Earthscan: London, UK; Washington, DC, USA, 2010.
53. Telmo, C.; Luosada, K.; Moreira, N. Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross caloric value, ultimate and chemical analysis of wood. *Bioresour. Technol.* **2010**, *101*, 3808–3815. [\[CrossRef\]](#)
54. Obernberger, I.; Thek, G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass Bioenergy* **2004**, *27*, 653–669. [\[CrossRef\]](#)
55. Saravanapriya, G.; Shreelavaniya, R. Characterization of *Prosopis juliflora* and its products as a potential feedstock for energy generation. *Pharma Innov.* **2023**, *12*, 1673–1678.
56. Michell, A.; Higgins, H. *Infrared Spectroscopy in Australian Forest Products Research*; CSIRO Forestry and Forest Products: Melbourne, Australia, 2002; p. 60.
57. Carrillo, F.; Colom, X.; Sunol, J.J.; Saurina, J. Structural FTIR analysis and thermal characterisation of lyocell and viscose-type fibres. *Eur. Polym. J.* **2004**, *40*, 2229–2234. [\[CrossRef\]](#)
58. Bodirilau, R.; Teaca, C.A. Fourier transform infrared spectroscopy and thermal analysis of lignocellulose fillers treated with organic anhydrides. *Rom. J. Phys.* **2009**, *54*, 93–104.
59. Lopez-Velazquez, M.A.; Santes, V.; Balmaseda, J.; Torres-Garcia, E. Pyrolysis of orange waste: A thermo-kinetic study. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* **2013**, *99*, 170–177. [\[CrossRef\]](#)
60. Pucetaite, M. *Archaeological Wood from the Swedish Warship Vasa Studied by Infrared Microscopy*; Lund University Press: Lund, Sweden, 2012.
61. Scholz, G.; Windeisen, E.; Liebner, F.; Bäucker, E.; Bues, C.T. Wood anatomical features and chemical composition of *Prosopis kuntzei* from the Paraguayan Chaco. *IAWA J.* **2010**, *31*, 39–52. [\[CrossRef\]](#)
62. Ona, T.; Ito, K.; Shibata, M.; Ootake, Y.; Ohshima, J.; Yokota, S.; Yoshizawa, N.; Sonoda, T. In Situ Determination of Proportion of Cell Types in Wood by Fourier Transform Raman Spectroscopy. *Anal. Biochem.* **1999**, *268*, 43–48. [\[CrossRef\]](#)
63. Moosavi Nejad, S.M.; Madhoushi, M.; Rasouli, D.; Vakili, M. Nondestructive evaluation of wood chemical compounds used in Gorgan historical building via FT-IR spectroscopy. *J. Wood For. Sci. Technol.* **2017**, *23*, 313–328. [\[CrossRef\]](#)
64. Moosavinejad, S.M.; Madhoushi, M.; Vakili, M.; Rasouli, D. Evaluation of degradation in chemical compounds of wood in historical buildings using FT-IR and FT-Raman vibrational spectroscopy. *Maderas Cienc. Tecnol.* **2019**, *21*, 381–392. [\[CrossRef\]](#)
65. Yamauchi, S.; Iijima, Y.; Doi, S. Spectrochemical characterization by FT-Raman spectroscopy of wood heat-treated at low temperatures: Japanese larch and beech. *J. Wood Sci.* **2005**, *51*, 498–506. [\[CrossRef\]](#)
66. ASTM E11-20; Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2020.
67. TAPPI T264 cm-97; Preparation of Wood for Chemical Analysis. TAPPI Press: Atlanta, GA, USA, 2000.
68. Van Soest, P.V.; Robertson, J.B.; Lewis, B.A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.* **1991**, *74*, 3583–3597. [\[CrossRef\]](#)
69. Jaramillo, D.T.; Vélez, S.P.M.; Díaz, J.C.Q. Evaluación de pretratamientos químicos sobre materiales lignocelulósicos. *Ingeniare Rev. Chil. Ing.* **2017**, *25*, 733–743. [\[CrossRef\]](#)
70. ASTM D4442-20; Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2020.
71. ASTM D1102-84; Standard Test Method for Ash in Wood. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2013.
72. ASTM E872-82; Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2013.
73. Heya, M.N.; Hernández, A.L.R.; Pournavab, R.F.; Pintor, L.F.I.; Díaz-Jiménez, L.; Heya, M.S.; Cruz, L.R.S.; Parra, A.C. Physicochemical Characteristics of Biofuel Briquettes Made from Pecan (*Carya illinoensis*) Pericarp Wastes of Different Particle Sizes. *Molecules* **2022**, *27*, 1035. [\[CrossRef\]](#)
74. ASTM D5142-90; Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 1998.
75. Rotz, L.; Giazzi, G. *Characterization of Pharmaceutical Products by the Thermo Scientific FLASH 2000 Elemental Analyzer*; Thermo Fischer Scientific: Milan, Italy, 2012.
76. Ghetti, P.; Ricca, L.; Angelini, L. Thermal analysis of biomass and corresponding pyrolysis products. *Fuel* **1996**, *75*, 565–573. [\[CrossRef\]](#)

-
77. Arcibar-Orozco, J.A.; Josue, D.B.; Hurtado, J.C.R.; Méndez, J.R.R. Influence of iron content, surface area and charge distribution in the arsenic removal by activated carbons. *Chem. Eng. J.* **2014**, *249*, 201–209. [[CrossRef](#)]
 78. R Core Team. *A Language and Environment for Statistical Computing*; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2020.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

10. Anexo 3: Capítulo de libro y traducción de capítulo a lenguas originarias



10. Anexo 4: Congresos nacional e internacional



10. Anexo 4: Congresos nacional e internacional



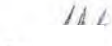
Morelia Michoacán, 11 de noviembre de 2022

A QUIEN CORRESPONDA PRESENTE

Se hace constar que la contribución titulada “**Determinación de la composición primaria de cuatro especies de fabáceas a través de un método químico (gravimétrico) y un método térmico (TGA-DTG)**” ha sido presentada por Pintor-Ibarra, L.F.; Alvarado-Flores, J.J.; Rutiaga-Quñones, J.G. en modalidad Cartel en el **1ER FORO EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LA MADERA** realizado el 11 de noviembre del 2022 en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera (Edificio D) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en la Ciudad de Morelia Michoacán.

Atentamente


Dra. Nelly Flores Ramírez
Representante del Comité Organizador
FITECMA-UMSNH


Ing. Sergio Mauricio Escobedo Torres
Director de la FITECMA-UMSNH


DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO
FITECMA



II FORO
CIENCIAS Y
TECNOLOGÍA DE
LA MADERA



Morelia Michoacán, 13 de diciembre de 2024

A QUIEN CORRESPONDA PRESENTE

Se hace constar que la contribución titulada: **Composición química de la madera de Prosopis Laevigata por termogravimetría (TGA-DTG)**, ha sido presentada por Pintor-Ibarra, L.F.; Alvarado-Flores, J.J.; Rutiaga-Quñones, J.G. en modalidad Cartel dentro del **2o FORO EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LA MADERA**, realizado el día 23 de octubre del 2024 en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en la Ciudad de Morelia Michoacán.

Atentamente


Dra. Nelly Flores Ramírez
Representante del Comité Organizador
Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo


Ing. Sergio Mauricio Escobedo Torres
Director de la
Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



cf979c64b57259d0e8f1ce6df0fbe3b7

Folio FITECMA: FCTM-011/FITECMA/2024

10. Anexo 5: Formación de recursos humanos de licenciatura y posgrado.

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
ACTA DE EXAMEN

En la ciudad de Morelia, Michoacán, siendo las 10:00 AM del día 30 de octubre de 2023 se reúnen en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, los CC. señores JOSÉ GUADALUPE RUTAGUA QUIÑONES, NICOLÁS GONZÁLEZ ORTEGA, FAHIDA EUGENIA PEDRAZA BUCIO, PEDRAZA BUCIO, CIRO HERNÁNDEZ ALVAREZ, LUIS FERNANDO PINTOR IBARRA, miembros del jurado designado para practicar el examen profesional con folio 152252 a **FEDERICO SALAZAR HERRERA** con matrícula **81689048**, quien nació el día 26 de abril de 1961 en el estado de Michoacán y con Clave Única de Registro de Población **5429164520501010101**, para obtener el título de Ingeniero en Tecnología de la Madera bajo la modalidad de Tests presentando el trabajo titulado: "Caracterización química de la madera y análisis de T-respectos de labores de la cancha del lago de Chapala, en Michoacán, México, con propiedades biotecnológicas." dirigido por JOSE GUADALUPE RUTAGUA QUIÑONES y **co-dirigido por LUIS FERNANDO PINTOR IBARRA**. El jurado procedió a practicar el examen ordinario correspondiente, conforme a las disposiciones reglamentarias vigentes. Concluida la evaluación, los integrantes del jurado deliberaron sobre la capacidad e idoneidad del sustentante acordando **APROBARLO POR UNANIMIDAD DE VOTOS**. En este acto comunicó al sustentante. Acto continuo, el Presidente del Jurado procedió a tomar la protesta en los siguientes términos: "Protesta conductiva con toda honradez y moralidad en el ejercicio de su profesión, atendiendo siempre presente las elevadas fines con los que la Universidad ha instituido esta carrera y que la misma tiene un carácter eminentemente social; así como normar su conducta, de acuerdo a los principios filosóficos sustentados por esta Máxima Casa de Estudios en el desarrollo de sus actividades?" contestando el sustentante "SI PROTESTO". Una vez leído lo anterior se levanta la presente acta, siendo las 11:20 AM del día 30 de octubre de 2023, firmados electrónicamente en señal de legal y debida constancia quienes en ella intervinieron, asistidos por NANCY ELIOSA RODRÍGUEZ ORTEGA en su carácter de Secretaria del Jurado quien da fe.

MIEMBROS DEL JURADO	
30/10/2023 11:20 AM JOSÉ GUADALUPE RUTAGUA QUIÑONES Presidente	30/10/2023 11:17 AM NICOLÁS GONZÁLEZ ORTEGA Síndico
30/10/2023 11:22 AM LUIS FERNANDO PINTOR IBARRA Síndico	30/10/2023 11:19 AM FAHIDA EUGENIA PEDRAZA BUCIO Síndico
30/10/2023 11:19 AM FAHIDA EUGENIA PEDRAZA BUCIO Síndico	30/10/2023 11:22 AM CIRO HERNÁNDEZ ALVAREZ Síndico

FEDERICO SALAZAR HERRERA
Sustentante

30/10/2023 11:25 AM
NANCY ELIOSA RODRÍGUEZ ORTEGA
Secretaria del Jurado

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
ACTA DE EXAMEN

En la ciudad de Morelia, Michoacán, siendo las 09:00 AM del día 11 de diciembre de 2024 se reúnen en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, los CC. señores JOSÉ JUAN ALVARADO FLORES, JOSÉ GUADALUPE RUTAGUA QUIÑONES, FAUSTINO RUÍZ AQUINO, RAFAEL HERRERA BUCIO, LUIS FERNANDO PINTOR IBARRA, miembros del jurado designado para practicar el examen de grado con folio 168144 a **FERNANDO DANIEL MENDEZ ZETINA** con matrícula **16143468**, quien nació el día 14 de diciembre de 1999 en el estado de Michoacán y con Clave Única de Registro de Población **MEZP9121HBMNNS05**, para obtener el grado de **Maestro en Ciencias y Tecnología de la Madera** bajo la modalidad de Tests presentando el trabajo titulado: "Análisis de la degradación térmica en el proceso de oxidación de la celulosa asociada a madera de Ceiba acapulcensis (Kuntz) Britton." dirigido por JOSÉ JUAN ALVARADO FLORES y **co-dirigido por LUIS FERNANDO PINTOR IBARRA**. El jurado procedió a practicar el examen ordinario correspondiente, conforme a las disposiciones reglamentarias vigentes. Concluida la evaluación, los integrantes del jurado deliberaron sobre la capacidad e idoneidad del sustentante acordando **APROBARLO POR UNANIMIDAD DE VOTOS**, lo cual se comunicó al sustentante. Acto continuo, el Presidente del Jurado procedió a tomar la protesta en los siguientes términos: "Protesta conductiva con toda honradez y moralidad en el ejercicio de su profesión, atendiendo siempre presente las elevadas fines con los que la Universidad ha instituido estas estudios de posgrado y que la misma tienen un carácter eminentemente social; así como normar su conducta, de acuerdo a los principios filosóficos sustentados por esta Máxima Casa de Estudios en el desarrollo de sus actividades?" contestando el sustentante "SI PROTESTO". Una vez leído lo anterior se levanta la presente acta, siendo las 10:53 AM del día 11 de diciembre de 2024, firmados electrónicamente en señal de legal y debida constancia quienes en ella intervinieron, asistidos por ABRIL MUNRO ROJAS en su carácter de Secretaria del Jurado quien da fe.

MIEMBROS DEL JURADO	
11/12/2024 10:40 AM JOSÉ JUAN ALVARADO FLORES Presidente	11/12/2024 10:43 AM JOSÉ GUADALUPE RUTAGUA QUIÑONES Síndico
11/12/2024 10:44 AM LUIS FERNANDO PINTOR IBARRA Síndico	11/12/2024 10:42 AM RAFAEL HERRERA BUCIO Síndico

FERNANDO DANIEL MENDEZ ZETINA
Sustentante

11/12/2024 10:56 AM
ABRIL MUNRO ROJAS
Secretaria del Jurado

EXAMEN PROFESIONAL PRESENTADO POR
FEDERICO SALAZAR HERRERA

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA

Código para validar

UNIVERSIDAD DE LA SIERRA JUÁREZ OAXACA

Jefatura de la División de Estudios de Posgrado
Oficio No. 094-I-DEP-01/24
Asunto: Constancia
Istlán de Juárez, Oax., a 17 de enero de 2024

A QUIEN CORRESPONDA Presente.-

El que suscribe, Jefe de la División de Estudios de Posgrado de la Universidad de la Sierra Juárez, por este conducto se permite HACER CONSTAR QUE:

El **M.C. Luis Fernando Pintor Ibarra**, fungió como **ASESOR de la tesis de Maestría "Aprovechamiento de biomasa forestal para la elaboración de biocompuestos densificados en la Sierra Sur del estado de Oaxaca"** realizada por la alumna, la **Ing. María Elena Jiménez Mendoza**, con matrícula No. 21065528, para obtener el título de **Maestría en Ciencias en Conservación de los Recursos Forestales**, misma que fue defendida y aprobada el día 09 de enero del año dos mil veinticuatro en las instalaciones de esta Universidad.

Se extiende la presente para los fines legales que convergen a la instancia, en Istlán de Juárez, Municipio de Istlán de Juárez, estado de Oaxaca, al decimoséptimo día del mes de enero del año dos mil veinticuatro.

Atentamente,
"Inter natura et scientia homo"

Dra. Alejandra Guzmán López
Jefa de la División de Estudios de Posgrado
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Cop. Dr. Martín Enrique Flores Carrizosa- Vice-Rector Académico.- Para su conocimiento
Cop. Asistente,
Cop. Archivo.

EXAMEN DE GRADO PRESENTADO POR
FERNANDO DANIEL MENDEZ ZETINA

PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LA MADERA

Código para validar

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
ACTA DE EXAMEN

En la ciudad de Morelia, Michoacán, siendo las 10:00 AM del día 02 de octubre de 2024 se reúnen en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, los CC. señores JOSÉ GUADALUPE RUTAGUA QUIÑONES, LUIS FERNANDO PINTOR IBARRA, VÍCTOR MANUEL HERRUTIA SORIANO, RAFAEL HERRERA BUCIO, JOSÉ JUAN ALVARADO FLORES, miembros del jurado designado para practicar el examen de grado con folio 177608 a **JESUS HERNANDEZ MENDEZ** con matrícula **16144880**, quien nació el día 07 de agosto de 1996 en el estado de Michoacán y con Clave Única de Registro de Población **HBM09010HBMNNS05**, para obtener el grado de **Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera** bajo la modalidad de Tests presentando el trabajo titulado: "Caracterización de los pellets con fibras biotecnológicas elaborados a partir de la madera de ceiba acapulcensis." dirigido por JOSÉ GUADALUPE RUTAGUA QUIÑONES y **co-dirigido por LUIS FERNANDO PINTOR IBARRA**. El jurado procedió a practicar el examen ordinario correspondiente, conforme a las disposiciones reglamentarias vigentes. Concluida la evaluación, los integrantes del jurado deliberaron sobre la capacidad e idoneidad del sustentante acordando **APROBARLO POR UNANIMIDAD DE VOTOS CON MENCIÓN HONORÍFICA**, lo cual se comunicó al sustentante. Acto continuo, el Presidente del Jurado procedió a tomar la protesta en los siguientes términos: "Protesta conductiva con toda honradez y moralidad en el ejercicio de su profesión, atendiendo siempre presente las elevadas fines con los que la Universidad ha instituido estos estudios de posgrado y que la misma tienen un carácter eminentemente social; así como normar su conducta, de acuerdo a los principios filosóficos sustentados por esta Máxima Casa de Estudios en el desarrollo de sus actividades?" contestando el sustentante "SI PROTESTO". Una vez leído lo anterior se levanta la presente acta, siendo las 11:52 AM del día 02 de octubre de 2024, firmados electrónicamente en señal de legal y debida constancia quienes en ella intervinieron, asistidos por ABRIL MUNRO ROJAS en su carácter de Secretaria del Jurado quien da fe.

MIEMBROS DEL JURADO	
02/10/2024 11:50 AM JOSÉ GUADALUPE RUTAGUA QUIÑONES Presidente	02/10/2024 11:49 AM LUIS FERNANDO PINTOR IBARRA Síndico
02/10/2024 11:47 AM JOSÉ JUAN ALVARADO FLORES Síndico	02/10/2024 11:52 AM VÍCTOR MANUEL HERRUTIA SORIANO Síndico
02/10/2024 11:52 AM VÍCTOR MANUEL HERRUTIA SORIANO Síndico	02/10/2024 11:46 AM RAFAEL HERRERA BUCIO Síndico

JESUS HERNANDEZ MENDEZ
Sustentante

02/10/2024 12:00 PM
ABRIL MUNRO ROJAS
Secretaria del Jurado

10. Anexo 6: Divulgación de la ciencia



10. Anexo 6: Divulgación de la ciencia



10. Anexo 6: Divulgación de la ciencia



10. Anexo 7: Reconocimiento



El Gobierno del Estado de Michoacán, a través del
Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación

otorga a

LUIS FERNANDO PINTOR IBARRA

el nombramiento de

- Investigador Estatal -

Con número de registro

PIIM_PII90HMC4F4

Al ser aprobada su incorporación al **Padrón de Investigadoras e Investigadores de Michoacán (PIIM)** por el Comité de Evaluación del ICTI, durante el periodo comprendido del 24 de abril de 2025 al 23 de abril de 2028, en virtud de sus logros en la realización de trabajo de investigación

Dra. Alejandra Ochoa Zarzosa

Directora General del Instituto de Ciencia,
Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán

DATOS DEL FIRMANTE

RFC: OOZA720610S70

NOMBRE: ALEJANDRA OCHOA ZARZOSA

NO CERTIFICADO: 00001000000512647018

CN: AUTORIDAD CERTIFICADORA

Folio: 14526ae2-57cb-5885-95a7-90097103af73

Email: aleocho@hotmail.com

FIRMA ELECTRÓNICA AVANZADA



ZÁwwQF880hZIMU7L9RKsEOIzFT41AoQmcSBjKwgWz25Z2o+GFSMIGyPyfIDcAR3MbZ33HfUWUo/WpHKIAH
13e7eliv2eVhOJzv8EOFeFT8PuLqK+8ksc8+RX16UYSAmX3b6kWwgiT0pde3Agu2t6mtYnfwcYhrWvs2iOyWVVKyho
st53UIntK3S2hyvGJL841N267v8UgpiEJ6yofWlPghc9sT1UHp0Y/hGwKQ7hGviabr+b04XplcpL/7yU+ljWERsqsr0fGaf
uyv9g2PZ7Fic9InMr1stfVVG2EhwE7DFakRS+Sa8GIUZ+rWw1CvXCfeeXKA2Q==

El presente documento electrónico ha sido firmado mediante el uso de la firma electrónica avanzada del firmante con póliza emitida por la autoridad certificadora de la Secretaría de Finanzas y Administración, y es válido de conformidad con la Disposición en Materia de 1ª y 2ª. Firmado por la Ley de Firma Electrónica Avanzada y el Artículo 12 de su Reglamento. El presente documento electrónico, en su totalidad, se podrá comprobar en el portal electrónico de verificación de documentos con el código de verificación: 14526ae2-57cb-5885-95a7-90097103af73.

El presente documento electrónico ha sido firmado mediante el uso de la firma electrónica avanzada del firmante con póliza emitida por la autoridad certificadora de la Secretaría de Finanzas y Administración, y es válido de conformidad con la Disposición en Materia de 1ª y 2ª. Firmado por la Ley de Firma Electrónica Avanzada y el Artículo 12 de su Reglamento. El presente documento electrónico, en su totalidad, se podrá comprobar en el portal electrónico de verificación de documentos con el código de verificación: 14526ae2-57cb-5885-95a7-90097103af73.

Luis Fernando Pintor Ibarra

Determinación de la composición primaria de cuatro especies de fabáceas a través de un método químico (gravimétrico) y u...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:612983044

Fecha de entrega

7 ago 2026, 9:42 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

7 ago 2026, 9:51 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Determinación de la composición primaria de cuatro especies de fabáceas a través de un método....pdf

Tamaño del archivo

13.2 MB

75 páginas

13.475 palabras

74.441 caracteres

24% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 24%  Fuentes de Internet
- 22%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Doctorado en Ciencias y Tecnología de la Madera	
Título del trabajo	Determinación de la composición primaria de cuatro especies de fabáceas a través de un método químico (gravimétrico) y un método térmico (TGA-DTG)	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Luis Fernando Pintor Ibarra	luis.pintor@umich.mx
Director	José Juan Alvarado Flores	jjalvarado@umich.mx
Codirector	José Guadalupe Rutiaga Quiñones	jose.rutaga@umich.mx
Coordinador del programa	Lada Domratcheva Lvova	doc.cs.tecnologia.madera@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Luis Fernando Pintor Ibarra
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 05 de agosto 2026