



Ingeniería y Desarrollo

ISSN: 0122-3461

ISSN: 2145-9371

Fundación Universidad del Norte

LÓPEZ CHALARCA, LILIANA TRINIDAD; VEGA RODRÍGUEZ, LEIDY YANETH;
RENDÓN COLORADO, CARLOS DANIEL; TOBÓN ROJAS, SEBASTIÁN

Caracterización de los residuos de la industria maderera
para su aprovechamiento en diferentes aplicaciones

Ingeniería y Desarrollo, vol. 38, núm. 1, 2020, Enero-Junio, pp. 104-124
Fundación Universidad del Norte

DOI: <https://doi.org/10.14482/inde.38.1.691.1>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85270674007>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UDEM  redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<http://dx.doi.org/10.14482/inde.38.1.691.1>

Caracterización de los residuos de la industria maderera para su aprovechamiento en diferentes aplicaciones

Characterization of wood industry waste for use in different applications

LILIANA TRINIDAD LÓPEZ CHALARCA *
LEIDY YANETH VEGA RODRÍGUEZ **
CARLOS DANIEL RENDÓN COLORADO ***
SEBASTIÁN TOBÓN ROJAS ****

*Magíster en Ingeniería Química. Servicio Nacional de Aprendizaje, Sena, Itagüí, Antioquia (Colombia). ltlopez86@misena.edu.co

**Ingeniera Química. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Grupo de Investigación TAYEA. Medellín, Antioquia (Colombia). lyvegar@unal.edu.co

***Ingeniero Mecánico. Servicio Nacional de Aprendizaje, Sena. Centro Tecnológico del Mobiliario. Grupo de Investigación Matermob, Itagüí, Antioquia (Colombia). crendonc@sena.edu.co

****Ingeniero Biológico. Servicio Nacional de Aprendizaje, Sena. Centro Tecnológico del Mobiliario. Grupo de Investigación Matermob, Itagüí-Antioquia (Colombia). stobon3@misena.edu.co

Correspondencia: Dirección: Liliana Trinidad, dirección: Cl. 63 #58B-03, Sena, Itagüí, Antioquia.



Resumen

La madera se considera un material versátil y valioso, puesto que no solo se utiliza como fuente de energía o como material estructural —dadas sus propiedades mecánicas y su aspecto visual— sino también para la elaboración de productos de consumo no alimenticios, tales como productos farmacéuticos, pinturas, adhesivos, productos textiles, compuestos poliméricos, cosméticos, papeles y diversos productos básicos. Motivada por la diversidad de especies madereras y la creciente disponibilidad de residuos madereros, la actual investigación busca caracterizar los residuos de tres especies maderables que predominan en la industria colombiana: *Tectona grandis*, *Pinus patula* y *Acacia mangium*, con el fin de promover su transformación en productos industriales de mayor valor que el producto de desecho. Muestras representativas se sometieron a caracterización física, química y térmica mediante análisis de densidad, pH, análisis último, análisis próximo, contenido lignocelulósico, extractivos y poder calorífico. Los resultados obtenidos permitieron valorar los residuos madereros como un recurso de mayor valor para generar productos reciclados como, por ejemplo, tableros de partículas, fibras o alistonados, u otros materiales como biopulpas para papel, materiales compuestos, bioadsorbentes y carbón activado, e igualmente destinada a la producción de combustibles tipo biochar, syngas y bioaceite.

Palabras clave: industria maderera, residuos de madera, procesamiento y utilización de residuos de madera.

Abstract

Wood is considered a versatile and valuable material. It is used as an energy source or as a structural material -for its mechanical properties and visual appearance- and also for the production of non-food consumer products, such as pharmaceutical products, adhesives, textile products, polymeric compounds, cosmetics, papers and various basic products. Motivated by the diversity of wood species and the increasing availability of wood residues, the following investigation is intended to characterize the residues of three timber species that predominate in Colombian industry: *Tectona grandis*, *Pinus patula* and *Acacia mangium*, in order to promote their transformation into industrial products of greater value than the waste product. Sample wood was subjected to physical, chemical and thermal characterization by means of tests of: density, pH, last analysis, proximal analysis, lignocellulosic content, extractive and calorific value. The results obtained allowed the evaluation of wood waste as a resource of greater value to generate recycled products such as particle boards, fibers or laminated and other materials such as biopulps, composite materials, bioadsorbents and activated carbon, and also the production of fuels type biochar, syngas and bio-oil.

Keywords: wood processing industry, wood waste, wood waste processing and utilization.

1. INTRODUCCIÓN

La madera siempre ha sido—y es aún—un recurso natural importante. Se cosecha cada año con el fin de utilizarse como material para la construcción, la comunicación, la navegación y el mobiliario, o para la producción de tableros, pulpa, papel o cartón y productos químicos y combustibles [1]–[3]. Desde el momento de la extracción de la madera en los bosques se generan residuos (p. ej., el follaje, las entresacas, las ramas y la parte de la corteza) que se dejan en las zonas de extracción; sin embargo, la mayor proporción de los residuos se genera en la etapa de transformación, dimensionado y mecanizado de la madera para la generación de productos de valor agregado. Muchos autores coinciden en afirmar que en los aserraderos se genera entre el 45 % y el 65 % de desperdicios por tonelada de madera procesada [4]–[7].

Ahora bien, el manejo y la disposición de residuos difiere de nación a nación, y de comunidad a comunidad. En Estados Unidos y Serbia, por ejemplo, los residuos de madera se utilizan como madera recuperada para combustible y productos tales como tableros de partícula y lecho de animales [8], [9]. En otros países (p. ej., Nigeria) un gran porcentaje de residuos no puede reutilizarse, lo que ha dado lugar a prácticas de quema a cielo abierto, vertidos en cuerpos de agua o vertidos en una zona abierta que constituyen una contaminación ambiental [10]–[12]. En Colombia, estos residuos se han convertido en un problema productivo y ambiental debido a la reducción del espacio disponible en los centros de elaboración de madera y los riesgos ambientales que originan por incendios y autocombustión y/o propagación de plagas y enfermedades [13]. De esta manera, la disposición final de los residuos va de la mano de la composición física-química y la capacidad térmica de estos, de las tecnologías e infraestructura existentes e, incluso, de las políticas ambientales desarrolladas en cada país.

Entre las aplicaciones más promisorias para la utilización de los desechos de madera se encuentran las aplicaciones energéticas. Sin lugar a dudas, la madera fue la primera fuente de energía renovable y sostenible, pues es capaz de almacenar energía de la luz solar en los enlaces químicos de sus componentes estructurales y liberarla cuando se rompen los enlaces entre las moléculas adyacentes de carbono, hidrógeno y oxígeno por algún proceso de transformación [14]–[16]. Dicha energía puede aprovecharse mediante diferentes procesos termoquímicos para obtener energía eléctrica o térmica. Uno de los procesos más investigados ha sido la pirólisis, en el cual la biomasa se descompone termoquímicamente por calentamiento lento o rápido, en ausencia total de agentes oxidantes, y se lleva a cabo en un rango de temperatura de 300–650 °C [17], [18]. Sus productos son de tres tipos principales: líquido o bioaceite, biochar y gases (CO_2 , H_2O , CO , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_6H_6) [18], [19]. Otro proceso interesante es la gasificación, caracterizado por la conversión térmica de material orgánico en gases de combustión, debido a la oxidación parcial del precursor a altas temperaturas, por lo general, en un rango

de 800-1000 °C. En este proceso se utilizan agentes oxidantes (aire, oxígeno, vapor o sus combinaciones) a fin de producir un syngas formado principalmente por H_2 y CO [16], [18], [20]–[22]. También se encuentra la combustión, el proceso térmico más simple y común por el que se convierte el precursor en energía. Se ha utilizado durante miles de años en chimeneas o estufas simples para cocinas y a fin de calentar el espacio; en este proceso ocurre la oxidación completa de todo el contenido orgánico del combustible; y se utiliza aire/oxígeno con el propósito de obtener energía térmica y gases de combustión, los cuales consisten, principalmente, en dióxido de carbono y agua [16], [17], [23].

La madera no solo se utiliza como combustible, sino también como materia prima para producir productos (p. ej., papel y cartón) a partir de sus componentes estructurales. Esto, sobre todo, con la celulosa, al existir en mayor porcentaje en la madera y demostrar gran potencial —debido a su estructura química— para la producción de biomateriales nuevos [24]. La obtención de la celulosa se realiza por métodos químicos, biotecnológicos, mecánicos o una combinación de los anteriores, lo que permite la eliminación de la lignina en la elaboración de productos tales como papel, textiles y tableros [24], [25]. Los medios químicos y mecánicos tienen como factor común altos costos de capital, altos consumo de energía y/o reactivos químicos y generación de subproductos con valores comerciales relativamente bajos [25]. Con el objetivo de mejorar estos problemas se utiliza en la actualidad un proceso biotecnológico conocido como el “biopulpado”, el cual utiliza hongos o microorganismos que degradan selectivamente la lignina presente en la madera, de modo que dejan la celulosa relativamente intacta [26]. Con el biopulpado se aseguran ahorros en consumos energéticos, reducción significativa de contaminantes en el aire (lo que incluye el CO_2 y algunos compuestos azufrados que causan olores), reducción de los químicos necesarios para pulpa y reducción de la carga de desechos en el efluente, así como mejoras en la calidad del papel [25], [27], [28].

Otra utilidad que se le puede dar a los residuos madereros se encuentra en la elaboración de materiales compuestos, al aprovechar las propiedades de dos o más materiales que, al combinarse o unirse en proporciones adecuadas, facilitan la formación de un nuevo material con propiedades diferentes, usualmente superiores a las de los constituyentes base [29]. Con esta fusión lo que se busca es obtener un compuesto con baja absorción de humedad, resistencia a la degradación y ataque biológico, buena estabilidad dimensional, baja densidad y alta rigidez y resistencia [30]–[34]. Los tableros madera-plástica y madera-cemento son los más comunes.

La madera puede convertirse en una opción de fuente de energía renovable alternativa a partir de la fabricación de *pellets*, una forma condensada de energía provechosa en términos de transporte, almacenamiento y manipulación [35], [36]. El proceso de conformación del *pellets* se basa en el principio de compresión o prensado que

permite compactar residuos de la madera tales como aserrín, virutas o *chips* en partículas sólidas cilíndricas de tamaño uniformes y homogéneas [36]; al final se obtiene un material denso, con bajo contenido de humedad y gran dureza y un contenido energético más alto [37], [38]. Los *pellets* se utilizan en la generación de calor y electricidad a nivel industrial y doméstico [39], [40], o como lecho/cama para caballos y gatos en reemplazo de la paja tradicional utilizada en los establos [41].

La obtención de carbón activado a partir de residuos es otra muestra de la naturaleza versátil de la madera. El carbón activado es un material carbonoso amorfo con una superficie porosa altamente desarrollada y una concentración relativamente alta de grupos funcionales hidrofílicos en su superficie que le confieren la capacidad de adsorber productos químicos de gases y líquidos [42]. Tienen gran demanda en los sectores alimenticio, químico, farmacéutico, textil y, en general, en todos aquellos sectores que requieran un tratamiento de efluentes contaminados, principalmente, por metales pesados [43].

Hasta este momento, en la mayoría de las aplicaciones presentadas se aprovechan los residuos de la madera en forma de polvo, virutas o aserrín, de modo que se deja de lado la corteza, la cual contiene muchos compuestos químicos de alto valor, tales como ácidos resínicos, fitoesteroides, polifenoles o taninos, terpenos, catotenoides, flavonoides y otros compuestos [44], [45]. Estos han sido ampliamente estudiados por su potencial aplicación en diferentes áreas, como, por ejemplo, las de alimentos, cosmetología, medicina e industria farmacéutica [46]. Los taninos son los compuestos químicos de mayor importancia; su extracción permite la obtención de adhesivos [47]–[49] y bioadsorbentes [45], [50], [51].

Si se considera la gran disponibilidad de residuos madereros en Colombia y el alto potencial que tiene la madera para la obtención de productos con valor agregado, este trabajo expone las diferentes aplicaciones de los residuos madereros y su viabilidad de aplicación de acuerdo con sus características térmicas, físicas y químicas. Las especies madereras a estudiar incluyen *Tectona grandis*, *Pinus patula* y *Acacia mangium*, escogidas por la viabilidad que poseen respecto a su sostenibilidad, disponibilidad y accesibilidad y por su alto impacto en la productividad de los diferentes sectores industriales, principalmente en la industria del mobiliario.

2. METODOLOGÍA

Se realizó una toma de muestras de residuos de maderas en diferentes aserríos ubicados en el departamento de Antioquia, Colombia, para las especies madereras *Tectona grandis*, *Pinus patula* y *Acacia mangium*. Se definieron y delimitaron las partes del tronco de cada especie. En este sentido, se tomaron muestras de la parte externa

(que incluye corteza muerta y floema) y de la parte interna (lo que incluye la albura, el duramen y la médula).

Todos los análisis se repitieron por duplicado con el propósito de confirmar los resultados obtenidos y reducir el error en la medición.

Análisis químico

El material se secó y molió con el fin de obtener diferentes tamaños de partículas entre malla 30 y 60. A fin de evaluar las cantidades relativas de los elementos químicos presentes en las muestras (carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno) se realizaron pruebas en un analizador elemental CE-440 CHN/O/S Elemental Analyzer de Exeter Analytical, adoptando la norma ASTM D5373-02 para biomasa [52]–[54]. En el marco del análisis químico también se llevó a cabo un análisis próximo utilizando una balanza termogravimétrica, de acuerdo con la norma ASTM D7582-15 [55]. En este método la muestra pierde progresivamente masa a medida que se somete a una rampa de temperatura en una atmósfera controlada (nitrógeno/oxígeno); de esta manera, es posible conocer el contenido de la humedad, la materia volátil y las cenizas presentes.

Asimismo, se realizó un análisis lignocelulósico mediante la norma NREL/TP-510-42618, para lo cual se usó cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) [56] y un análisis de extractivos con norma TAPPI; en este último análisis se incluye extracción en etanol bajo la norma TAPPI T-204 cm-97 [57], en agua fría y caliente, de acuerdo con TAPPI T-207 y TAPPI T-207 cm-99, respectivamente [58].

Poder calorífico superior

La determinación del poder calorífico superior de la biomasa se realizó mediante los procedimientos descritos en la norma ASTM D5865-13, empleando una bomba calorimétrica.

Análisis físico

Entre los análisis físicos se midió la densidad aparente bajo NTC 206-1: 2005, ISO 13061-2: 204, y el pH de las especies maderables durante cuatro, ocho y veinticuatro horas, tomando 2 g de muestra en 10 ml de agua destilada, con un tamaño de partícula entre malla 30 y malla 60.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Caracterización química

En la tabla 1 se detallan los resultados de la caracterización de los residuos de madera de *Tectona grandis*, *Pinus patula* y *Acacia mangium*, mediante el análisis próximo, elemental, de contenido lignocelulósico y de extractivos.

TABLA 1. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE RESIDUOS DE MADERA
(PARTE EXTERNA Y PARTE INTERNA) DE DIFERENTES ESPECIES

Parámetro	T. grandis		P. patula		A. mangium	
	Parte externa	Parte interna	Parte externa	Parte interna	Parte externa	Parte interna
Análisis próximo (wt. %)						
Humedad	8,63	10,78	10,62	7,54	10,01	10,40
Material volátil, VM	70,52	71,29	64,73	77,39	59,48	71,76
Carbono fijo, FC	12,75	15,62	23,18	14,78	26,68	17,42
Cenizas	8,10	2,31	1,47	0,29	3,83	0,42
Fuel ratio (FC/VM)	0,181	0,219	0,358	0,191	0,449	0,243
Análisis elemental (wt. %)						
C	39,68	47,48	49,61	47,29	48,03	48,87
H	4,94	5,6	5,12	5,74	4,73	5,62
N	0,53	0,28	0,44	0,21	0,94	0,28
S	0,04	0,03	0,04	0,03	0,06	0,04
Análisis Lignocelulósico (wt. % daf)						
Lignina	32,40	35,60	38,68	32,32	23,72	37,53
Celulosa	32,22	35,15	20,12	36,56	24,80	40,42
Hemicelulosa	27,58	22,98	27,51	26,74	17,20	15,12
Extractivos	7,80	6,27	13,69	4,37	34,27	6,94

*d.a.f (dry and ash free) significa libre de cenizas y humedad.

En general, las muestras analizadas presentan una humedad alrededor o por debajo del 10 %, lo cual resulta óptimo para aplicaciones energéticas, dado que un contenido

de agua por encima del 30 % afecta la ignición del combustible, reduce el poder calorífico de los productos gaseosos —debido al gasto energético que se requiere para la evaporación del agua antes de llevar a cabo la combustión o la gasificación de la biomasa— y, por ende, se reduce el rendimiento para la generación de calor o energía del combustible [59], [60]. En general, el contenido de material volátil de las muestras está por encima del 70 % y el contenido de carbono fijo entre el 12 % y el 26 %. Ambos valores son los esperados para biomásas. Según lo reportado en la literatura, el contenido de VM en las biomásas debe estar entre 76 y 86 % en base seca y el contenido de FC entre el 15 % y el 25 % [61].

La relación de carbono fijo y material volátil (FC/MV) indica la facilidad de ignición del combustible. Al comparar las biomásas con el carbón mineral se tiene que las primeras presentan mayor facilidad de encendido debido a su mayor contenido de MV pero queman más rápido, mientras que el carbón es difícil de encender más su reacción es mucho más lenta. En general, las biomásas tienen una relación $FC/MV < 0,25$, tal como se observa en la mayoría de las biomásas tratadas (alto contenido de MV y bajo de FC), mientras que para los carbones esta relación se ubica por encima de 1,0 [62]. Analizados estos resultados se considera que las especies maderables estudiadas pueden tener potencial de aprovechamiento mediante el proceso de pirólisis, el cual permite obtener gases de combustión permanentes tales como CO_2 y H_2 en menor medida, y vapores condensables (bioaceite) y char en una proporción mayor [63].

en cuanto al contenido de ceniza, las partes externas presentan un mayor contenido (entre el 5 % y el 20 %). Para aplicaciones energéticas, especialmente en procesos de gasificación, se desea que el contenido de ceniza esté por debajo del 0,3 % [61], [64]. Un contenido bajo de cenizas facilita el uso de la biomasa como combustible debido a que incrementa el poder calorífico y evita escoriación e incrustaciones en calderas y gasificadores, en especial cuando la ceniza es alta en óxidos alcalinos y sal, lo que produce mezclas eutécticas con bajo punto de fusión [60], [65]. Todas las especies analizadas presentan un contenido de ceniza aceptable, exceptuando la parte externa de *T. grandis* que tiene un contenido superior comparado con la de las otras especies.

El análisis último no aporta información acerca de la factibilidad de emplear la madera en procesos termoquímicos tales como pirólisis, combustión o gasificación, pero tiene relación directa con los productos obtenidos y el comportamiento de algunos procesos. En general, las maderas tienen un contenido de C (47-59 %), H (5,6-7,0 %), O (40-45 %), N (<0,1-0,5) y S (<0,01-0,05) [61], semejante a los resultados reportados. De esta manera, los resultados muestran que los residuos de madera contienen una mayor proporción de carbono en comparación con el hidrógeno y el oxígeno, lo que indica un posible aprovechamiento más enfocado hacia la producción de char y bioaceites que para la

producción de gases, aunque este planteamiento debería validarse mediante procesos de pirólisis, gasificación y reactividad a fin de constatar el supuesto.

Los resultados del análisis del poder calorífico de las muestras fueron: para la parte externa y la parte interna de *T. grandis* se obtuvo un valor de 14 903 kJ/kg y 18 581 kJ/kg, respectivamente. En el caso de la parte externa e interna de *P. Patula*, los valores del poder calorífico fueron 19 169 kJ/kg y 18 296 kJ/kg, respectivamente. Por su parte, se obtuvo valores de 18 556 kJ/kg y 18 345 kJ/kg, correspondientes a la parte externa y a la parte interna de *A. mangium*. Al relacionar los resultados obtenidos del último análisis con los valores del poder calorífico se evidencia que el contenido de oxígeno aporta negativamente a este valor, tal como ocurre para la parte externa de *T. grandis* en comparación con las otras biomásas analizadas. Un valor aceptable del poder calorífico para las biomásas se encuentra entre 15 000 y 22 000 kJ/kg. Los valores de esta propiedad química de las diferentes especies estudiadas están en el rango reportado.

Al continuar con el análisis de las muestras para ser utilizadas en aplicaciones energéticas, de acuerdo con los resultados de los análisis lignocelulósicos presentados en la tabla 1, se destaca el mayor contenido de celulosa para la parte interna en comparación con la parte externa de la misma especie, y un mayor contenido de extractivos en la parte externa en comparación con la parte interna. Diversas investigaciones demuestran que la celulosa y la hemicelulosa son las principales fuentes de compuestos volátiles en la biomasa lignocelulósica [18], [66], de modo que es la celulosa una fuente primaria de vapor condensable en forma de bioaceite, la hemicelulosa una fuente de gases no condensables, y la lignina —debido a su contenido en compuestos aromáticos— aporta al rendimiento de biochar [67]. De esta manera, se identifica un posible potencial de aprovechamiento de las biomásas para generar biochar, y se destaca la parte externa de *A. mangium* y de *P. patula*, al contrastar su alto valor de poder calorífico con su alta relación FC/MV. Asimismo, se espera que las partes internas de las especies analizadas puedan utilizarse para la generación de bioaceite debido a su alto contenido de celulosa. No obstante, se debe tener cuidado con la presencia de cenizas por encima del 0,3 %.

Ahora bien, con relación a la evaluación de la capacidad que tienen los residuos estudiados para el aprovechamiento en la producción de pulpa destinada a papel, rayón y tableros, es relevante analizar el contenido de celulosa. Se destaca la parte interna de la especie *A. mangium* dado que presenta un valor relativamente aceptable (40,42%), si se considera que valores cercanos o superiores al 40 % se tienen como viables para la elaboración de estos productos [68]. Sin embargo, no se podría usar de manera directa sin realizar antes un tratamiento, debido a que implicaría bajos rendimientos en la obtención de celulosa como consecuencia de su alto contenido de lignina (37,53 %), el cual es superior al 25 % sugerido para la obtención de papel

[69], y al 0,2 % sugerido para la aplicación de rayón [70]. Para la aplicación del rayón igualmente se requiere un contenido de hemicelulosa en la pulpa final menor al 6 % [70]. En lo que respecta al contenido de extractivos, *A. mangium* presenta valores cercanos al permitido para el proceso de obtención de pulpa en la aplicación de papel, el cual debe estar entre 1,5 % y 6 % wt [71]; para su utilización en la obtención de rayón este valor debe ser menor a 0,5 % wt [72]. Resultados similares se encontraron para la parte interna de *T. grandis*. Finalmente, al analizar la parte interna de *P. patula*, se considera que es una especie con potencial de aprovechamiento para estas aplicaciones dado que tanto la celulosa como los extractivos se encuentran en los rangos establecidos (36,56 % y 4,37 %, respectivamente), por lo que obtendría mejores rendimientos en la obtención de pulpa y rayón.

Para el uso de residuos maderables en la producción de tableros se debe garantizar que el contenido de humedad esté entre el 6 % y el 15 % para tableros sin tratar y entre el 11 % y el 18 % para tableros tratados con conservante; esto con el fin de permitir una buena unión en el proceso de laminación [73]. Las especies maderables analizadas cumplen este requerimiento, por lo que pueden ser ampliamente utilizadas en esta aplicación. En la fabricación de materiales compuestos como, por ejemplo, el tablero madera-cemento (que incluye tableros de fibro-cemento, lana de madera-cemento, partículas y virutas aglomeradas con cemento), la parte interna de la *A. mangium* resulta ser promisoría, dado su bajo contenido en hemicelulosa, lo que evitaría incompatibilidades y un efecto inhibitorio sobre la hidratación del cemento [74]. Adicionalmente, para esta aplicación se recomienda que el contenido de extractivos estén por debajo del 4 %, por lo que especies que presenten valores superiores deben someterse a un pretratamiento químico, mecánico o una combinación de ellos.

La caracterización química realizada a las muestras también permite evaluar otras aplicaciones como, por ejemplo, la elaboración de *pellets* y el carbón. De este modo, se evidencia que las especies estudiadas tienen un contenido bajo de cenizas y un contenido alto de lignina, lo cual es propicio para que se utilicen en la elaboración de *pellets*, si se considera que la lignina es un aglutinante natural cuando la madera se calienta entre 50 y 150 °C. Por esta razón, el contenido de lignina debe estar entre el 20 % y el 30 %, y el contenido de cenizas debe estar en un intervalo del 1 % al 1,5 %, en el que se acepta un 1 % para ramas y un 1,5 % para leña, ramas, especies coníferas y frondosas [75], [76]. De acuerdo con lo anterior, la parte interna de la *A. mangium* y el *P. patula*, así como la parte externa del *P. patula* son aptas para la producción de *pellets*. Según los estudios realizados por Correa Mendez *et. al*, para la producción de *pellets* se puede mezclar aserrín con corteza (hasta en un 25,49 %) o mezclar virutas con la parte externa (hasta en 61,67 %); en ambos casos se pueden obtener *pellets* con propiedades aceptables [77]. Finalmente, en lo que respecta a la recuperación de estos residuos para producción de carbón activado, el contenido de ceniza de las maderas recomendado debe ser inferior

al 8 % [78] y el contenido de lignina debe estar entre el 18 % y el 35 %, de acuerdo con estudios realizados por Zibetti *et al.* [79], Khezami *et al.* [80] y Kim *et al.* [81]. Un contenido mayor de lignina favorece la producción de carbones microporosos, mientras que un contenido alto de material volátil favorece la formación de carbones macroporosos. Asimismo, un contenido alto de carbono fijo puede aportar al incremento en la porosidad y al rendimiento. En general, las especies maderables estudiadas pueden ser aptas para la producción de carbón activado.

A fin de analizar la factibilidad de los residuos de las especies analizadas en la obtención de bioadsorbentes y adhesivos a partir de la recuperación de taninos, se realizó la determinación de extractivos en etanol, agua fría y agua caliente bajo la metodología TAPPI, cuyos resultados se resumen en la tabla 2.

TABLA 2. RENDIMIENTO DE EXTRACCIÓN EN ETANOL, AGUA FRÍA Y CALIENTE PARA *TECTONA GRANDIS*, *PINUS PATULA* Y *ACACIA MANGIUM*

Especie	Parámetro	Parte interna (%)	Parte externa (%)
<i>T. grandis</i>	Extractivos en etanol	2,84	1,65
	Extractivos agua fría	1,42	8,27
	Extractivos en agua caliente	2,65	11,19
<i>P. patula</i>	Extractivos en etanol	1,85	9,24
	Extractivos agua fría	1,42	17,06
	Extractivos en agua caliente	2,65	17,15
<i>A. mangium</i>	Extractivos en etanol	3,42	30,10
	Extractivos agua fría	2,77	30,13
	Extractivos en agua caliente	3,64	40,59

Fuente: elaboración Propia.

Valores superiores al 30 % de extractivos sugieren la presencia de polifenoles y taninos condensables, los cuales son necesarios para la elaboración de adhesivos y bioadsorbentes [58], [82]. Se evidencia un alto contenido de extractivos para la parte externa de *A. mangium* superior al 30 %, con las dos metodologías aplicadas: NREL (véase la tabla 1) y TAPPI (véase la tabla 2).

Estos resultados demuestran que esta especie es promisoría para la obtención de taninos y, por ende, en la fabricación de adhesivos y bioadsorbente. El anterior planteamiento debería confirmarse con el análisis de polifenoles y taninos condensables en la determinación de extractivos.

Caracterización física

En la tabla 3 se encuentran los resultados de la densidad y del análisis de pH. En el análisis de densidad, realizado solo a la parte interna de cada especie, se identifica que las tres especies tienen un valor similar, si bien es menor la densidad del *P. patula*, lo cual es congruente con su tipología de madera blanda (conífera). En general, estos resultados se encuentran en conformidad con los reportados en la literatura para las especies de estudio [43], [83]–[90].

TABLA 3. DENSIDAD Y pH DE *TECTONA GRANDIS*, *PINUS PATULA* Y *ACACIA MANGIUM*

	<i>T. grandis</i>		<i>P. patula</i>		<i>A. mangium</i>	
	Parte interna	Parte externa	Parte interna	Parte externa	Parte interna	Parte externa
Densidad (gr/cm ³)	0,551	---	0,513	---	0,538	---
pH	6,71	6,21	5,39	4,32	5,11	4,51

Fuente: elaboración Propia.

Al evaluar los resultados del pH se evidencia que la parte interna, compuesta de albura y duramen, es más ácida que la parte externa de la misma especie. La importancia del pH de las especies maderables se exhibe en aplicaciones como, por ejemplo, la producción de tableros, en especial tableros madera-cemento y madera-plástico, en la que el control de este parámetro es crucial para formar una unión con cemento/plástico, deseable y aceptable. En la fabricación de tableros madera-cemento se requiere que el pH sea inferior a 5 [91], esto con el fin de evitar la inhibición del cemento y las incompatibilidades con la madera. En cuanto a la fabricación de tablero madera-plástico se identifica que, en general, todas las especies evaluadas son aptas. Por ejemplo, la parte interna de *P. patula* cumple con la condición del pH y extractivos, pero, dado que su contenido de hemicelulosa es un poco alto, debe someterse a pretratamiento a fin de llevar a cabo la aplicación de madera-cemento.

Por último, se considera que el compostaje es la práctica de manejo de residuos más común en las industrias madereras. Sin embargo, para que el proceso de compostaje sea eficiente, la materia prima debe contener compuestos orgánicos biodegradables y suficientes nutrientes para apoyar el crecimiento microbiano. Por tanto, se evalúa el pH, cuyo valor debe estar entre 5 y 8 [92], [93], puesto que en este rango se favorece el desarrollo y el crecimiento óptimo de las raíces de las plantas, de modo que aumenta la presencia de algunos nutrientes. Las especies evaluadas, excepto las partes externas de *P. patula* y *A. mangium*, cumplen con este requisito, aunque no se debe dejar de lado el contenido de extractivos, el cual debe estar por debajo del 2 % para eliminar la fitotoxicidad del compost.

4. CONCLUSIONES

Los desechos de madera no solo son una oportunidad para la generación de energías limpias, sino también en el propósito de generar productos renovables destinados a aplicaciones industriales. La selección de las especies de madera adecuadas para una aplicación particular requiere conocer la caracterización fisicoquímica completa de estas, la valoración de la disponibilidad del recurso en el país, su valor competitivo con respecto a otras materias primas y qué tanto valor se le puede añadir con dicha aplicación. Se identificó un potencial de aprovechamiento de los residuos de madera con el fin de generar biochar, en lo que se destaca la parte externa de la *A. mangium* y *P. patula*. Asimismo, se visualiza el potencial para la generación de bioaceites, sobre todo, en las partes internas de las especies analizadas, debido a su mayor contenido de celulosa. Con relación al potencial que demostraban tener los residuos estudiados en la generación de energía mediante un proceso de gasificación, se concluye que la parte interna de *T. grandis*, así como las partes externas de *P. patula* y *A. mangium*, podrían verse favorecidas en este proceso, a causa de su alto contenido de carbono fijo y su bajo contenido de material volátil. Para la aplicación en otros materiales, las partes internas de *P. patula* y de *A. mangium* presentan una mayor afinidad en lo que se refiere a la obtención de rayón y papel, así como en la producción de tableros madera-cemento. La especie *T. grandis* tiene un futuro prometedor con respecto a la obtención de taninos y, por ende, en las aplicaciones de adhesivos y bioadsorbentes. Ahora bien, en la fabricación de tableros de madera-plástico se identifica que, en general, todas las maderas evaluadas son aptas para su preparación, así como para la aplicación de compostaje, excepto las partes externas de *P. patula* y *A. mangium*, aunque las partes internas de estas especies son aptas para la producción de *pellets*. En fin, la totalidad de las maderas evaluadas cumplen la condición para la producción de carbón activado.

Agradecimientos

Los autores agradecen al sistema de investigación y desarrollo tecnológico SENNOVA-Sena por los recursos financiados para la elaboración del proyecto “Caracterización de residuos generados en la cadena productiva del sector maderero para su aprovechamiento”, con número SIGP 19933 de 2015, así como a las empresas que suministraron el material de residuos de madera para los análisis experimentales: Reforestadora La Argentina, Tablemac, Bio-estibas, Bosquema, Pizano, Madepatula y Núcleos de Madera.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, *Cadena productiva forestal —tableros aglomerados y contrachapados— muebles y productos de madera*. Bogotá, 2007. Disponible en: http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/5513/1/2008313114521_Forestal.pdf
- [2] X. Acevedo Gaitán, & H. Martínez Covalada, *Características y estructura del sector forestal-madera-muebles en Colombia*. Bogotá: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2003. Disponible en: <http://repiica.iica.int/DOCS/BO038E/BO038E.PDF>
- [3] W. G. Hubbard, «Wood bioenergy», en *Bioenergy. Biomass to biofuels*, A. Dahiya, ed. Elsevier Inc., 2015, pp. 55-71. Doi: 10.1016/b978-0-12-407909-0.00004-3
- [4] T. A. Erhabor, «Evaluation of wood wastes from sawmilling operations in Benin City, Edo State», *Journal of Forestry Research and Management*, vol. 12, pp. 113-124, 2015.
- [5] Scottish Government, *Woodwaste arisings in Scotland: assessment of available data on Scottish*. Glasgow: Remade Scotland (Recyclate Market Development programme), Glasgow Caledonian University, 2004.
- [6] B. Olufemi, J. Olalekan, & S. Oluyinka, «Lumber recovery efficiency among selected sawmills in Akure, Nigeria», *Drvna Industrija*, vol. 63, n.o 1, pp. 15-18, 2012. Doi: 10.5552/drind.2012.1111
- [7] A. Barua, A. Tarek, A. Chowdhury, S. H. Mehidi, & H. M. Muhiuddin, «Residue reduction and reuse in wooden furniture manufacturing industry», *International Journal of Scientific and Engineering Research*, vol. 5, n.o 10, 2014.
- [8] B. Falk, & D. McKeever, «Generation and recovery of solid wood waste in the U. S.», *BioCycle*, vol. 53, n.o 8, pp. 30-32, 2012. Disponible en: <https://www.biocycle.net/2012/08/15/generation-and-recovery-of-solid-wood-waste-in-the-u-s/>
- [9] B. Derčan, T. Lukić, M. Bubalo-Živković, B. Durev, R. Stojšavljević, & M. Pantelić, «Possibility of efficient utilization of wood waste as a renewable energy resource in

- Serbia», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, n.º 3, pp. 1516-1527, 2012. Doi: 10.1016/j.rser.2011.10.017
- [10] J. Mayowa, H. Olawale, & I. Olalekan, «Sustainable wood waste management in Nigeria», *Environ. Socio-economic Stud.*, vol. 4, n.º 3, pp. 1-9, 2016. Doi: 10.1515/environ-2016-0012
- [11] K. Oluoti, G. Megwai, A. Pettersson, & T. Richards, «Nigerian wood waste: a dependable and renewable fuel option for power production», *World Journal of Engineering and Technology*, vol. 2, pp. 234-248, 2014. Doi: 10.4236/wjet.2014.23025
- [12] U. P. Onochie, E. K. Orhorhoro, & P. E. Oyiboruona, «Economic potential and benefits of sawdust in Nigeria», *Int. J. Res. Publ.*, vol. 9, n.º 1, 2018. Doi: 1009172018296
- [13] M. B. Sarmiento Oviedo, «Alternativas de compostaje de aserrín de pino caribe (*Pinus caribaea*) en la industria maderera Refocosta S. A., municipio de Villanueva, Casanare, Colombia», *Rev. Investig. Agrar. y Ambient.*, vol. 2, n.º 2, pp. 21-32, 2011.
- [14] P. McKendry, «Energy production from biomass (part 1): overview of biomass», *Bioresour. Technol.*, vol. 83, pp. 37-46, 2002. Doi: 10.1016/S0960-8524(01)00118-3
- [15] R. C. Saxena, D. K. Adhikari, & H. B. Goyal, «Biomass-based energy fuel through biochemical routes: a review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n.º 1, pp. 167-178, 2009. doi: 10.1016/j.rser.2007.07.011
- [16] L. Zhang, C. (Charles) Xu, & P. Champagne, «Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass», *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, n.º 5, pp. 969-982, 2010. Doi: 10.1016/j.enconman.2009.11.038
- [17] R. C. Brown, *Thermochemical processing of biomass: conversion into fuels, chemicals and power*. Chichester, RU: John Wiley & Sons, 2011.
- [18] P. Basu, *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory*, 2ª ed. Elsevier Inc, 2013.
- [19] E. Kantarelis, W. Yang, & W. Blasiak, «Biomass pyrolysis for energy and fuel production», en *Technologies for converting biomass to useful energy-combustion, gasification, pyrolysis, torrefaction and fermentation*, E. Dahlquist, ed. CRC Press, 2013, pp. 245-271.
- [20] P. Parthasarathy, & K. S. Narayanan, «Hydrogen production from steam gasification of biomass: influence of process parameters on hydrogen yield-a review», *Renew. Energy*, vol. 66, pp. 570-579, 2014. Doi: 10.1016/j.renene.2013.12.025
- [21] R. L. Bain, & K. Broer, «Gasification», en *Thermochemical processing of biomass: conversion into fuels, chemicals and power*, R. C. Brown, ed. John Wiley & Sons, 2011, pp. 47-77. Doi: 10.1002/9781119990840.ch3
- [22] S. Pang, «Advances in thermochemical conversion of woody biomass to energy, fuels and chemicals», *Biotechnol. Adv.*, vol. 37, n.º 4, pp. 589-597, 2019. Doi: 10.1016/j.biotechadv.2018.11.004

- [23] S. Van Loo, & J. Koppejan. *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Earthscan, 2012.
- [24] K. Rehman Hakeem, M. Jawaid, & U. Rashid, *Biomass and bioenergy applications*. Springer International Publishing, 2014.
- [25] P. Bajpai, *Environmentally friendly production of pulp and paper*. Hoboken, NJ, EE. UU: John Wiley & Sons, 2010.
- [26] P. Bajpai, *Biotechnology for pulp and paper processing*. Londres: Springer Science & Business Media B. V., 2012.
- [27] M. Akhtar, G. M. Scott, R. E. Swaney, & T. K. Kirk, *Overview of biomechanical and biochemical pulping research*, en *Enzyme Applications in Fiber Processing*. American Chemical Society, 1998, pp. 15-26. Doi: 10.1021/bk-1998-0687.ch002
- [28] T. K. Das, & C. Houtman, «Evaluating chemical-, mechanical-, and bio-pulping processes and their sustainability characterization using life-cycle assessment», *Environ. Prog.*, vol. 23, n.o 4, pp. 347-357, 2004. Doi: 10.1002/ep.10054
- [29] L. E. Arias Maya, & L. Vanegas Useche, «Materiales compuestos inteligentes», *Sci. Tech.*, vol. 2, n.o 25, pp. 143-148, 2004.
- [30] J. Kuk Kim, & K. Pal, *Recent advances in the processing of wood-plastic composites*. Berlín: Springer International Publishing, 2010.
- [31] P. F. Sommerhuber, J. Welling, & A. Krause, «Substitution potentials of recycled HDPE and wood particles from post-consumer packaging waste in substitution potentials of recycled HDPE and wood particles from post-consumer packaging waste in wood-plastic composites», *Waste Manag.*, vol. 46, pp. 76-85, 2015. Doi: 10.1016/j.wasman.2015.09.011
- [32] D. D. Stokke, Q. Wu, & G. Han, *Introduction to wood and natural fiber composites*. John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [33] S. Karade, & L. K. Aggarwal, «Cement-bonded lignocellulosic composites for building applications», *Met. Mater. Process.*, vol. 17, n.o 2, pp. 129-140, 2005.
- [34] A. Saunders, & E. Davidson, «Cement Boards 101», *Global Cement Magazine*, enero, pp. 32-39, 2014.
- [35] J. S. Tumuluru, C. T. Wright, J. R. Hess, & K. L. Kenney, «A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application», *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, vol. 5, n.o 3, pp. 683-707, 2011. Doi: 10.1002/bbb.324
- [36] W.-H. Chen, J. Peng, & X. T. Bi, «A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 847-866, 2015. Doi: 10.1016/j.rser.2014.12.039

- [37] S. Döring, «Biomass types for pellet production», en *Power from pellets. Technology and applications*. Berlín: Springer Science & Business Media B.V., 2013, pp. 13-30. Doi: 10.1007/978-3-642-19962-2_2
- [38] N. A. Fredes Núñez, *Evaluación técnica y económica de una planta de producción de combustible sólido a partir de biomasa forestal en la región de Los Lagos*. Universidad de Chile, 2014.
- [39] T. Miranda, I. Montero, F. J. Sepúlveda, J. I. Arranz, C. V. Rojas, & S. Nogales, «A review of pellets from different sources», *Materials*, vol. 8, no. 4, pp. 1413-1427, 2015. Doi: 10.3390/ma8041413
- [40] D. P. Garcia, J. C. Caraschi, G. Ventorim, & F. H. A. Vieira, «Trends and challenges of Brazilian pellets industry originated from agroforestry», *Cerne*, vol. 22, no. 3, pp. 233-240, 2016. Doi: 10.1590/01047760201622032115
- [41] Wood Pellets, «3 uses for wood pellets (aside from heating)», *Wood Pellets.com*, 2015. Disponible en: <https://www.woodpellets.com/blog/2015/07/03/3-uses-for-wood-pellets-aside-from-heating/>
- [42] J. A. Menéndez-Díaz, & I. Martín-Gullón, «Types of carbon adsorbents and their production», en *Activated carbon surfaces in environmental remediation*, vol. 7. Elsevier B.V., 2006, pp. 1-48. Doi: 10.1016/S1573-4285(06)80010-4
- [43] J. F. Herrera Builes, W. A. Morales Yepes, & J. D. Pérez Schile, «Selección de un método para producir carbón activado utilizando cuatro especies forestales», *Rev. Fac. Nac. Agron.*, vol. 57, no. 2, 2004. Doi: 10.15446/rfnam
- [44] J. Clark, & F. Deswarte, *Introduction to chemicals from biomass*, 2ª ed. Reino Unido: Wiley, 2015.
- [45] R. Rowell, *Handbook of wood chemistry and wood composites*. EE. UU.: Taylor & Francis Group, 2005.
- [46] A. Aires, R. Carvalho, & M. J. Saavedra, «Valorization of solid wastes from chestnut industry processing: extraction and optimization of polyphenols, tannins and ellagitannins and its potential for adhesives, cosmetic and pharmaceutical industry», *Waste Manag.*, vol. 48, pp. 457-464, 2016. Doi: 10.1016/j.wasman.2015.11.019
- [47] Y. Yazaki, & P. J. Collins, «Wood adhesives based on tannin extracts from barks of some pine and spruce species», *Holz als Roh-und Werkst.*, vol. 52, pp. 307-310, 1994. Doi: 10.1007/BF02621420
- [48] J. C. F. Walker, *Primary wood processing. Principles and practice*, 2ª ed. Países Bajos: Springer, 2006.
- [49] M. Naceur Belgacem, & A. Gandini, *Monomers, polymers and composites*. Ámsterdam: Elsevier Ltd, 2008.

- [50] P. M. Kunnambath, & S. Thirumalaisamy, «Characterization and utilization of tannin extract for the selective adsorption of Ni (II) ions from water», *Journal of Chemistry*, vol. 2015, p. 9, 2015. Doi: 10.1155/2015/498359
- [51] M. Yurtsever, & I. A. Sengil, «Biosorption of Pb (II) ions by modified quebracho tannin resin», *J. Hazard. Mater.*, vol. 163, n.o 1, pp. 58-64, 2009. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.06.077
- [52] Exeter Analytical, «CE440 elemental analyzer», 2015.
- [53] R. García, C. Pizarro, A. G. Lavín, & J. L. Bueno, «Characterization of Spanish biomass wastes for energy use», *Bioresour. Technol.*, vol. 103, n.o 5, pp. 249-258, 2012. Doi: 10.1016/j.biortech.2011.10.004
- [54] D05 Committee, «ASTM D5373-16: standard test methods for determination of carbon, hydrogen and nitrogen in analysis samples of coal and carbon in analysis samples of coal and coke», ASTM International, 2016. Doi: 10.1520/D5373-16
- [55] D05 Committee, «ASTM D7582-15: Standard test methods for proximate analysis of coal and coke by macro thermogravimetric analysis», ASTM International, 2015. Doi: 10.1520/D7582-15
- [56] E48 Committee, «ASTM E1758-01(2015): standard test method for determination of carbohydrates in biomass by high performance liquid chromatography», ASTM International, 2015. Doi: 10.1520/E1758-01R15
- [57] Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), «T-204 cm-97: solvent extractives of wood and pulp», TAPPI test methods, p. 12, 2007. Disponible en: <https://www.tappi.org/content/sarg/t204.pdf>
- [58] Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), «T207cm-99. Water solubility of wood and pulp», 1999.
- [59] A. Demirbas, «Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues», *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 31, n.o 2, pp. 171-192, 2005. Doi: 10.1016/j.pecs.2005.02.002
- [60] P. McKendry, «Energy production from biomass (part 3): Gasification technologies», *Bioresour. Technol.*, vol. 83, n.o 1, pp. 55-63, 2002. Doi: 10.1016/S0960-8524(01)00120-1
- [61] C. Telmo, J. Lousada, & N. Moreira, «Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood», *Bioresour. Technol.*, vol. 101, pp. 3808-3815, 2010. Doi: 10.1016/j.biortech.2010.01.021
- [62] S. V. Vassilev, C. G. Vassileva, & V. S. Vassilev, «Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: an overview», *Fuel*, vol. 158, pp. 330-350, 2015. Doi: 10.1016/j.fuel.2015.05.050

- [63] M. I. Jahirul, M. G. Rasul, A. A. Chowdhury, & N. Ashwath, «Biofuels production through biomass pyrolysis-a technological review», *Energies*, vol. 5, n.o 12, pp. 4952-5001, 2012. Doi: 10.3390/en5124952
- [64] I. Obernberger, T. Brunner, & G. Bänthaler, «Chemical properties of solid biofuels-significance and impact», *Biomass and Bioenergy*, vol. 30, pp. 973-982, 2006. Doi: 10.1016/j.biombioe.2006.06.011
- [65] K. L. Kenney, W. A. Smith, G. L. Gresham, & T. L. Westover, «Understanding biomass feedstock variability», *Biofuels*, vol. 4, no. 1, pp. 111-127, 2013. Doi: 10.4155/bfs.12.83
- [66] A. Garcia-Maraver, D. Salvachúa, M. J. Martínez, L. F. Diaz, & M. Zamorano, «Analysis of the relation between the cellulose, hemicellulose and lignin content and the thermal behavior of residual biomass from olive trees», *Waste Manag.*, vol. 33, pp. 2245-2249, 2013. Doi: 10.1016/j.wasman.2013.07.010
- [67] S. Wang, X. Guo, K. Wang, & Z. Luo, «Influence of the interaction of components on the pyrolysis behavior of biomass», *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 91, n.o 1, pp. 183-189, 2011. Doi: 10.1016/j.jaap.2011.02.006
- [68] H. P. S. A. Khalil, M. S. Alwani, & A. K. M. Omar, «Chemical composition, anatomy, lignin distribution, and cell wall structure of Malaysian plant waste fibers», *BioResources*, vol. 1, n.o 2, pp. 220-232, 2006.
- [69] C. Foelkel, «Papermaking properties of Eucalyptus trees, woods, and pulp fibers», en *Eucalyptus online book & newsletter*, 2009, pp. 1-110. Disponible en: <http://www.eucalyptus.com.br/eucalptos/ENG14.pdf>
- [70] Chen, C. *et al.*, «Cellulose (dissolving pulp) manufacturing processes and properties: a mini-review», *BioResources*, vol. 11, n.o 2, pp. 5553-5564, 2016.
- [71] M. A. Azeez, J. E. Andrew, & B. B. Sithole, «A preliminary investigation of nigerian gmelina arborea and bambusa vulgaris for pulp and paper production», *Maderas. Cienc. y Tecnol.*, vol. 18, no. 1, pp. 65-78, 2016. Doi: 10.4067/S0718-221X2016005000007
- [72] S. Cao, X. Ma, L. Lin, F. Huang, L. Huang, & L. Chen, «Morphological and chemical characterization of green bamboo (*Dendrocalamopsis oldhami* (Munro) Keng f.) for dissolving pulp production», *BioResources*, vol. 9, no. 3, pp. 4528-4539, 2014. Doi: 10.15376/biores.9.3.4528-4539
- [73] M. P. Ansell, *Wood composites*. Cambridge: Elsevier, 2015.
- [74] G. Vaickelionis, & R. Vaickelioniene, «Cement hydration in the presence of wood extractives and pozzolan mineral additives», *Ceramics-Silikaty*, vol. 50, no. 2, pp. 115-122, 2006.

- [75] C. Amengual, & A. Triguero, *Implantación central de biomasa forestal y aprovechamiento de las masas forestales*. Barcelona: Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona, 2013.
- [76] L. Lima Rojas, *Evaluación de la composición química y propiedades físicas de la madera y parte externa de cuatro coníferas para la producción de bioenergía*. Universidad Autónoma de Nuevo León, 2012.
- [77] F. Correa-Méndez, «Distribución granulométrica en subproductos de aserrío para su posible uso en *pellets* y briquetas», *Rev. Mex. Ciencias For.*, vol. 5, n.o 25, pp. 52-63, 2014.
- [78] J. Pastor-Villegas, J. F. Pastor-Valle, J. M. Rodríguez Meneses, & M. García García, «Study of commercial wood charcoals for the preparation of carbon adsorbents», *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 76, n.o 1-2, pp. 103-108, 2006. Doi: 10.1016/j.jaap.2005.08.002
- [79] G. Zibetti, R. Benítez, & E. Calandri, «Elaboración de carbón activado: contenidos celulares vs. carbón fijado en tres especies de interés forestal de la provincia de Formosa», en *II Jornadas de Investigación en Ingeniería del NEA y Países Limítrofes*, 2000.
- [80] L. Khezami, A. Chetouani, B. Taouk, & R. Capart, «Production and characterisation of activated carbon from wood components in powder: cellulose, lignin, xylan», *Powder Technol.*, vol. 157, n.o 1-3, pp. 48-56, 2005. Doi: 10.1016/j.powtec.2005.05.009
- [81] M. R. Kim, E. L. Buonomo, A. L. Cukierman, P. R. Bonelli, & D. Industrias, «Obtención de biocombustibles y carbón activado a partir de un precursor renovable», *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 11, pp. 127, 2007.
- [82] H. Sixta, *Handbook of pulp*, vol. 1. Weinheim: Wiley-VCH, 2006.
- [83] Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA, «Ficha técnica Acacia Mangium», pp. 1-3, 2005.
- [84] R. Moya Roque, F. Muñoz Acosta, C. Salas Garita, A. Berocal Jiménez, L. Leandro-Zúñiga, & E. Esquivel-Segura, «Tecnología de madera de plantaciones forestales: fichas técnicas», *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 7, n.o 18-19, pp. 18-19, 2012.
- [85] Instituto de Recursos Naturales Renovables-Inrenare, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza-Catie, Asociación Nacional para la Conservación de la Naturaleza-Ancon, & Asociación Nacional de Reforestadores de Panamá-Anarap, *Memorias: Seminario Técnico-Acacia Mangium, Comportamiento y Potencial en Panamá*, 1994.
- [86] O. S. Meneses Tirira, *Identificación de usos probables de Pinus Patula Schlect. et Cham. con base en la determinación de las propiedades físico-mecánicas y de trabajabilidad de la madera en Iltaqui-Cotacachi-Imbabura*. Universidad Técnica del Norte, 2011.
- [87] Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé. *Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina colombiana: Pino Patula*. Manizales: Serie Cartillas Divulgativas, 2011.

- [88] R. Crespo-Gutiérrez, E. Jiménez-Romero, G. Law-Blanco, & C. Sánchez-Fonseca, «Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis* L.F.) de Quevedo y Balzar», *Cienc. y Tecnol.*, vol. 1, pp. 55-63, 2008. Doi: 10.18779/cyt.vii2.23
- [89] C. A. Rivas, *Idea de proyecto establecimiento de plantaciones forestales comerciales en los departamentos de Chinandega y Matagalpa, Nicaragua*. Nicaragua: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura-IICA, 2004.
- [90] Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial Colombia, *Acceso a la cadena productiva de la madera: Teca*. Universidad del Tolima.
- [91] W. Valenzuela, & T. Cruz, «Aptitud de la madera de cinco especies forestales para fabricar tableros de fibro-cemento», *Rev. For. del Perú*, vol. 11, n.o 10, pp. 1-17, 2004.
- [92] L. Cooperband, *The art and science of composting a resource for farmers and compost producers*. University of Wisconsin-Madison, Center for Integrated Agricultural Systems, 2002. Disponible en: <https://www.cias.wisc.edu/wp-content/uploads/2008/07/artofcompost.pdf>
- [93] T. Sánchez-Córdova, A. Aldrete, V. M. Cetina-Alcalá, & J. López-Upton, «Caracterización de medios de crecimiento compuestos por corteza de pino y aserrín», *Madera Bosques*, vol. 14, n.o 2, pp. 41-49, 2008.