



Determinación de usos potenciales de la madera de tachuelo (*Zanthoxylum rhoifolium* Lam.) de las propiedades físico-mecánicas y características anatómicas.

Cristian David Aldana Amaya¹, Andrés Felipe Silva Rosas² & Luis Fernando Soler Umbarila³

crdaldanaa@correo.udistrital.edu.co¹, afsilvar@correo.udistrital.edu.co², lfsoleru@correo.udistrital.edu.co³

Ingeniería Forestal, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Bogotá, Cundinamarca^{1,2,3}
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia^{1,2,3}



Imagen ilustrativa.

Determinación de usos potenciales

de la madera de tachuelo (*Zanthoxylum rhoifolium* Lam.)

de las propiedades físico-mecánicas
y características anatómicas.

Resumen

La madera posee múltiples propiedades que se encuentran en función del tipo de especie, variación anisotrópica, y las características anatómicas y fisicoquímicas, que al caracterizar permite determinar el uso potencial y adecuado para cada especie forestal. De esta manera se determinaron los usos potenciales para la madera de Tachuelo (*Zanthoxylum rhoifolium* Lam.), a partir de características anatómicas y propiedades físico-mecánicas de su madera. Las características anatómicas se evaluaron macro y microscópicamente en los tres planos de estudio obteniendo una relación importante con las propiedades mecánicas, adicionalmente las propiedades físico-mecánicas fueron evaluadas mediante las normas de la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT) y norma técnica colombiana (NTC), obteniendo resultados ajustados al 12% de contenido de humedad; su análisis estadístico se realizó con base en la media aritmética y la desviación estándar. Los resultados de las características anatómicas revelan la presencia de poros pequeños a medios, con alta frecuencia (hasta 28 poros/mm²), radios en serie triseriados, fibras septadas y delgadas con grosor de 2.9 μ m; las propiedades físicas revelan una densidad básica presenta un valor de 0.67 g/cm³ clasificada como pesada, un coeficiente de estabilidad dimensional de 1.65 categorizada como madera normal y una contracción volumétrica total de 13.5% categorizada como moderada; las propiedades mecánicas la compresión paralela presentó una resistencia de 380.23 kg/cm² clasificada como media, la compresión perpendicular con un valor de 149.36 kg/cm² categorizada como baja y cizallamiento con 146.78 kg/cm². Se determinó que los usos potenciales de la madera de Tachuelo se concentran alrededor de la elaboración de estructuras como vigas, durmientes, columnas, pisos, puertas, mangos de herramientas y tableros.

Palabras clave: Compresión paralela, compresión perpendicular, densidad, flexión, propiedades físico-mecánicas.

Abstract

Wood has multiple properties that are found depending on the type of species, anisotropic variation, and the anatomical and physical-chemical characteristics, which when characterizing it allows determining the potential and appropriate use for each forest species. In this way, the potential uses for Tachuelo wood (*Zanthoxylum rhoifolium* Lam.) Were determined, based on the anatomical characteristics and physical-mechanical properties of its wood. The anatomical characteristics were evaluated macroscopically and microscopically in the three study planes, obtaining an important relationship with the mechanical properties, additionally the physical-mechanical properties were evaluated using the standards of the Pan American Commission of Technical Standards (COPANT) and colombian technical standard (NTC), obtaining results adjusted to 12 % moisture content; its statistical analysis was performed based on the arithmetic mean and standard deviation. The results of the anatomical characteristics reveal the presence of small to medium pores, with high frequency (up to 28 pores / mm²), seriate triseriate rays, septate and thin fibers with a thickness of 2.9 μ m; the physical properties reveal a basic density presents a value of 0.67 g / cm³ classified as heavy, a dimensional stability coefficient of 1.65 categorized as standard wood and a total volumetric contraction of 13.5% categorized as moderate; The mechanical properties parallel compression presented a resistance of 380.23 kg / cm² classified as medium, perpendicular compression with a value of 149.36 kg / cm² categorized as low and shear with 146.78 kg / cm². Potential uses for Tachuelo wood were found to be concentrated around the construction of structures such as beams, sleepers, columns, floors, doors, tool handles, and boards.

Keywords: Bending, Density, physical-mechanical properties, Parallel compression, perpendicular compression.

Introducción

Colombia cuenta con un amplio potencial de especies forestales, sin embargo, de acuerdo con Cárdenas y Salinas (2007) y Blanco (2020) es posible identificar una fuerte presión sobre algunas de estas que a nivel histórico poseen una connotación comercial. El tachuelo (*Z. rhoifolium* Lam.) empleado frecuentemente en cerca vivas, pero que es conocido por comunidades de la cuenca del río Cauca como fuente para la obtención de postes y leña (Arena et al. 2012; Calle et al., 2014), Loureiro et al. (1981) lo destaca por su durabilidad y resistencia, que además registra múltiples usos desde carpintería general, instrumentos agrícolas hasta construcciones civiles en Brasil (Costa et al., 2014).

Es debido denotar que el conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas, resulta importante puesto que permite definir su comportamiento frente a usos establecidos, maximizar su valor y propiciar su aprovechamiento desde un enfoque industrial (Bárceñas, 1995; Roussy et al. 2013; Medina et al. 2020), incluso a partir del análisis anatómico es posible generar un juicio frente a actitudes y usos de la madera (León y Williams, 2005; León y William, 2006; León, 2015; Montaña-Arias et al. 2016), donde para especies bosques naturales resulta interesante ya que esto permite su uso de forma pertinente y desarrollo investigativo (Alvis-Gordo et al. 2017).

Por tanto, mediante este estudio, se determinan las propiedades físico-mecánicas y características anatómicas en la madera de *Z. rhoifolium* para determinar los usos potenciales que esta tiene. Donde a partir de la selección de individuos con características aceptables se obtuvo finalmente las probetas acordes a las normas del COPANT y NTC, adicionalmente para el análisis anatómico se siguió la metodología de Jansen et al. (1998).

Metodología

La selección de los individuos se realizó en el municipio de Enciso, Santander (Vereda Cortaderas,

Finca “La Camaleona”), mediante evaluación fenotípica a aquellos árboles que cumplieran los requisitos de alturas mayores o iguales a 10 metros, DAP mayor o igual a 30 cm, fuste recto, escasa presencia de nudos, copa densa, y estado fitosanitario óptimo, seleccionando los tres árboles acordes a estas características. Para su aprovechamiento se obtuvo tres rodajas delimitadas por la parte baja, media y alta del fuste por árbol, donde a partir de estas secciones en cada árbol fue obtenido un bloque de madera con las dimensiones de 20 cm de ancho por 20 cm de espesor y 150 cm de largo. El transporte menor fue desarrollado por paleteo hasta la vía primaria y posteriormente por transporte mayor por vía terrestre hasta Bogotá D.C. donde el material fue depositado en la bodega de maderas ubicada en la Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Fase de Laboratorio

Las pruebas de laboratorio para la identificación de las características anatómicas y propiedades físicas – mecánicas se realizaron en el Laboratorio de Maderas José Anatolio Lastra Rivera de la Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá. La ejecución de los métodos de laboratorio se realizó de acuerdo con las normas del Comité Panamericano de Normas Técnicas (COPANT) y las Norma Técnica Colombiana (NTC).

La determinación de las características anatómicas macroscópicas se realizó con probetas de 2.5 cm x 2.5 cm x 10 cm debidamente orientadas, realizando la observación por medio de una lupa de 10x; para análisis a nivel microscópico se elaboraron laminillas de acuerdo con la metodología de Jansen et al. (1998), Salgado et al. (2015) y García & Romero (2009), haciendo uso del micrótopo generando una sección que presente las características anatómicas con simetría y no menor a 0.25 mm²; posteriormente el proceso de tinción con Safranina concentrada al 1% y Xilol en cada corte, finalmente llevados a laminillas haciendo uso del adhesivo Eukitt®; por efectos de distinción se realiza la rotulación de la laminilla, registro y descripción anatómica de los tres planos de la especie por medio del microscopio.

La determinación de las propiedades físicas se realizó con probetas acordes con las normas del COPANT (1972) y el protocolo planteado por Solórzano *et al.* (2016), las probetas seleccionadas presentaban una correcta orientación y ninguna rajadura o daño. Para las propiedades mecánicas son empleadas probetas de acuerdo con los lineamientos estandarizados por el COPANT (1972), con la madera orientada, clasificada y dimensionada de acuerdo con el tipo de prueba (compresión paralela, compresión perpendicular, dureza, cizallamiento, flexión estática y tenacidad).

Finalmente es debido destacar que el tamaño de la muestra será de 30 probetas por cada sección y ensayo a realizar. Los ensayos se ejecutaron según lo establecido por Solórzano *et al.* (2016) mediante la máquina universal hidráulica Mohr & Federhaff con dispositivo de lectura SATURN PLUS para la determinación de las propiedades mecánicas y para la identificación de las propiedades físicas se emplearon estufas y balanza digital.

Fase de Oficina

Se determinaron los parámetros estadísticos a partir de los resultados obtenidos de deformaciones y cargas aplicadas para cada propiedad, los cuales se registraron por medio del software SATURN PLUS, para efectos de protocolo cada resultado del ensayo mecánico se ajustó a un contenido de humedad del 12%. De las variables determinadas por los ensayos, se calculan de acuerdo con el tipo de prueba RLP (resistencia en límite proporcional), RUM (resistencia unitaria máxima), MOE (Módulo de elasticidad), EUM (Esfuerzo unitario máximo), T (Tenacidad o impacto), Fuerza aplicada vs penetración (dureza) y kilogramos fuerza marcada (Tenacidad). Para la categorización de las características microscópicas y análisis de imágenes se utilizó el software ImageJ®. Para el análisis estadístico se utilizó el software Excel® 2016 y R Development Core Team.

Para la identificación de los usos potenciales se ajustó la metodología propuesta por Klinger & Talero (2001), realizando una base de datos con la compilación de información obtenida de propiedades físico-mecánicas y usos obtenidos de los estudios

revisados; para lo cual se identificaron los valores más cercanos a los obtenidos en la evaluación realizada en el presente estudio y a partir de esto fueron determinados los usos potenciales de tachuelo (*Z. rhoifolium*).

Resultados y Discusión

Descripción Microscópica

La madera de tachuelo presenta poros con forma circular a ovalados, disposición difusa, de tamaños pequeños a medios según la clasificación presentada por Loureiro *et al.* (1981), debido a que estos presentan diámetros inferiores a 90 μm y con frecuencia alta (hasta 28 poros/mm²). Se presentan predominancia de poros múltiples radiales cortos (2-3) y en menor proporción múltiples radiales largos (3 o más) y arracimados. Los resultados obtenidos de la caracterización a nivel microscópico se presentan en la tabla 1, con detalle en los valores obtenidos luego del procesamiento de imágenes microscópicas en el programa ImageJ®.

Tabla 1.
Características anatómicas de la madera de tachuelo. (*Z. rhoifolium*).

Elemento	Variable	Medida	Valor
Vasos	Diámetro	μm	48.73
	Frecuencia	No./mm ²	28
Fibras	Longitud	μm	71.77
	Diámetro	μm	23.02
	Grosor	μm	2.99
Radios	Altura	μm	264.38
	Número	No./mm ²	22
Lúmen	Diámetro	μm	14.59

Las placas de perforación son simples y con punteaduras intervasculares alternas. Presenta radios con mayor presencia triseriados o multi-seriados (en 4) y esporádicamente biseriados, son homocelulares de carácter decumbente y con más de cuatro líneas y la presencia de gomas en su interior. El parénquima axial es en bandas marginales que permiten caracterizar los anillos de crecimiento, de igual manera se presenta parénquima paratraqueal vasicentrico, apotraqueal escaso y difuso fácilmente observable. Las fibras son septadas y delgadas con un grosor de 3 μm en promedio y lúmenes de 14.59 μm . Esta caracterización está acorde a lo descrito por Loureiro *et al.* (1981) para la especie objeto de estudio.

Propiedades Físicas.

Las propiedades físicas determinadas para la madera de *Z. rhoifolium* fueron las densidades (verde, seca al aire, anhidra y básica), contracciones (tangencial total, radial total, volumétrica total y longitudinal total), volumen poroso y coeficiente de estabilidad dimensional, presentes en la tabla 2.

Tabla 2.
Propiedades físicas de la madera de tachuelo (*Z. rhoifolium*).

Propiedades Físicas		Valor
DENSIDAD (g/cm ³)	Verde	0.995
	Seca al aire (12%)	0.740
	Anhidra	0.720
	Básica	0.607
CONTRACCIÓN (%)	Tangencial Total	9.000
	Radial Total	4.467
	Longitudinal Total	0.480
	Volumétrica Total	13.498
Volumen Poroso (%)		51.98
Coef. Estabilidad Dimensional		1.649

Densidad.

La densidad se establece como la propiedad de la cual dependen la mayoría de los atributos tanto físicos como mecánicos (Pereyra & Gelid, 2002). De acuerdo con la clasificación determinada por Díaz (2005), la densidad seca al aire (CH=12%) con un valor de 0.74 g/cm³ permite que la especie se encuentre categorizada dentro de las semi-pesadas, mientras que la densidad verde obtiene un valor 0.995 g/cm³. Núñez (2007) establece que el valor de importancia tanto de la densidad en verde como seca al aire son parámetros de condiciones que se dan en el árbol verde y en la madera estacionada, el valor de densidad seca al aire se emplea normalmente con fines de comparación y para importancia del secado.

La densidad anhidra obtuvo un valor de 0.72 g/cm³ clasificada como medianamente pesada (Proexpo 1970 cit. en Guevara, 2001). La densidad básica con un valor de 0.607 se encuentra de la categoría de pesada-muy pesada propuesta por Moya *et al.* (2010) o alta de acuerdo con la clasificación propuesta por Puertas *et al.* (2013), esta categoría de densidad se caracteriza por presentar alta importancia para las propiedades tecnológicas, ya que está directamente relacionada, por tanto, es frecuentemente usada en la industria forestal usada para conocer la cantidad de masa seca del volumen verde medido (Núñez, 2007). La densidad básica suele catalogarse como indicadora de la resistencia de la madera, rigidez conductividad y ser relacionada con las propiedades mecánicas, es por eso por lo que a partir del valor obtenido de densidad básica para la madera de *Z. rhoifolium* se puede establecer que la madera presenta condiciones apropiadas para usos que impliquen exigencias de cargas.

Contracción.

La máxima contracción que se obtuvo fue la volumétrica total (13.498 %) categorizada dentro de una contracción moderada de la madera (Londoño, 2007), su valor permite determinar que a pesar de que la madera no presenta un alto valor de contracción volumétrica es susceptible a presentar cambios dimensionales por usos directos y permanentes con el agua (Fuentes *et al.* 2012).

Mientras que para los planos de estudio la máxima contracción se presentó en el plano tangencial, seguido del radial y por último el longitudinal, explicando la anisotropía y la proporción de contracciones que se presentan en la madera. La contracción tangencial total obtuvo un valor de 9.0 % explicando que es que presenta mayor espacio libre y menor número de células que opongan fuerza, como lo presenta en plano radial, en donde los radios ejercen presión para reducir las contracciones. De acuerdo con Solórzano et al. (2016) los valores de contracción radial y tangencial cumplen un papel importante para la determinación de los procesos industriales de secado.

Volumen Poroso.

El volumen poroso establece el total correspondiente a espacios vacíos dentro de un bloque de madera; en tanto el valor obtenido corresponde a 51.98%, este indica que se trata de una madera con categoría media de contenido poroso; el volumen poroso presenta una relación directa con la densidad de la madera, en la medida en que, si el volumen poroso de la madera es mayor la densidad de la madera es menor, es por eso que se relaciona el volumen poroso obtenido con la densidad obtenida (0.607 g/cm³) catalogada como medianamente densa, teniendo en cuenta que la mitad de esta corresponde a espacios vacíos; esto es acorde con lo señalado por Romero (2014) en donde explica que la habilidad para resistir tensiones aumenta con la densidad del sólido y disminuye con la porosidad. Además, se infiere que, debido a su valor moderadamente alto, la especie presenta alta capacidad de conductividad hidráulica al presentar mayor cantidad de espacio poroso para realizar el transporte del agua dentro del árbol. Del mismo modo el volumen poroso se puede relacionar con la conductividad térmica catalogándose de media a baja, esto teniendo en cuenta lo expuesto por Aeberhard (2013), en donde se evidencia que la conductividad térmica del aire que llena los poros es menor que la del material sólido (madera), además también determina a partir de lo anterior que los espacios de aire, se constituyen un mejor aislante.

Coefficiente de Estabilidad Dimensional.

La anisotropía de la madera permite explicar los cambios dimensionales radial y transversal presentan

valores diferentes, por lo tanto, es necesario y de utilidad determinar el coeficiente de estabilidad dimensional (CED) de la madera permitiendo precisar la susceptibilidad a presentar rajaduras y agrietamiento superficial durante el proceso de secado.

Para la madera de tachuelo el valor fue de 1.649, valor catalogado dentro de las maderas moderadamente estables por la clasificación de Lastra (1986 citado por Solorzano et al. 2016), el cual permite establecer que existe una posibilidad moderada a baja de que en el proceso de transformación y secado la madera tienda a presentar rajaduras, por lo tanto, es preciso determinar un programa y velocidad de secado óptimo que permita garantizar un menor desperdicio de madera por rajaduras y agrietamientos.

Propiedades Mecánicas.

Las propiedades mecánicas permiten la caracterización del comportamiento maderable frente a diversos factores externos, generalmente asociados a cargas haciendo alusión a fuerzas ejercidas como son deformaciones; para este caso es empleado el método destructivo para su determinación. En la tabla 3 se resumen los valores obtenidos para la evaluación de las propiedades mecánicas efectuadas sobre la madera del Tachuelo.

Tabla 3.
Propiedades mecánicas de la madera de tachuelo (Z. rhoifolium)

Prueba mecánica		Valor
Dureza	Radial (kg)	608.89
	Tangencial (kg)	634.39
	Extremos (kg)	569.86
Flexión	RUM (kg/cm ²)	1254.02
	MOE (tn/cm ²)	170.65
	RLP (kg/cm ²)	773.93
Compresión Perpendicular	RUM (kg/cm ²)	180.11
	RLP (kg/cm ²)	149.36
Compresión Paralela	RUM (kg/cm ²)	456.11
	MOE (tn/cm ²)	35.37
	RLP (kg/cm ²)	380.23
Cizallamiento	EUM (kg/cm ²)	146.78

Dureza.

La dureza es una característica determinante a nivel estructural y al diseño de interiores como ebanistería, los cuales se encuentran en función de la densidad y la humedad (Santillán-García, 2013). Pino-Rodríguez *et al.* (2007) la seña como la resistencia a la penetración por parte de diferentes objetos, siendo generalmente acero, abolladuras y al desgaste con respecto al tiempo y el contacto, para este caso es posible considerarse de carácter media a alta para los tres planos, de acuerdo con Téllez-Sánchez *et al.* (2009) la cual se puede ver íntimamente ligada a la densidad que para este caso es de 0.607 g/cm³ y a su vez al grosor de paredes celulares.

Teniendo en cuenta la tabla 3 se presentan los valores de dureza aplicados para cada plano asumiendo una orientación determinada; sin embargo, se identifican diferencias en cuanto a resistencia, las cuales se fundamentan en las características anatómicas, puesto que tomando como base a Pino-Rodríguez *et al.* (2007) el plano transversal presenta menor dureza siendo de 569.86 kg difiriendo de la premisa planteada por Rodríguez-Anda *et al.* (2015) basada en disposición de fibras, que se puede explicar debido a la presencia de parénquima vasicentrico, aliforme y marginal, para el plano tangencial se presenta el mayor valor de resistencia siendo de 634,39 kg debido a la oposición por parte de los radios además siendo agrupados.

Flexión.

Siendo de gran importancia de acuerdo con Ramírez *et al.* (2001) a nivel estructural puesto que mediante la flexión estática se tienen en cuenta propiedades como compresión, tracción e incluso cizalle, no obstante, cabe resaltar que la flexión estática como propiedad se encuentra en función de diversas características siendo densidad, inclinación de fibras, contenido de humedad, temperatura, dimensiones de la probeta y la presencia de nudos (Tsehaye & Walker, 1996; Santillán-García, 2013). De acuerdo con la tabla 3 es posible denotar un MOE de 170.65 tn/cm² que de acuerdo con Lastra (1986) citado por Triana- Gómez *et al.* (2008) como un valor alto, proporcionando una resistencia alta de deforma-

ción, adicionalmente un RLP que también se cataloga como alto siendo 773.93 kg/cm² y presentando un valor de RUM de 1254.02 kg/cm². Esta propiedad, se ve afectada por la presencia de nudos, que para este caso fue evidenciado y que de acuerdo con Dávalos-Sotelo & Ordoñez-Candelaria (2010) genera una afección reduciendo significativamente los marginales superiores de resistencia.

Compresión Perpendicular

La compresión perpendicular se encuentra ligada a la temperatura, densidad y contenido de humedad como fue planteado por Sepúlveda *et al.* (2013), junto con las características anatómicas que inciden en cuanto a la resistencia, siendo estas la inclinación de las fibras, la presencia de nudos, composición química y presencia de parénquima (Santillán-García, 2013). La compresión perpendicular y paralela a las fibras es determinante en el ámbito estructural de acuerdo Baño *et al.* (2012).

De los resultados se obtuvo una RLP de 149.36 kg/cm² que resulta bajo comparado con respecto a la tracción estática, donde este es superior lo cual puede fundamentarse en la presencia de parénquima axial que incide en la resistencia (Pino-Rodríguez *et al.*, 2007) no obstante es debido mencionar que este valor se puede concebir como alto de acuerdo con Fuentes-Salinas (1998), sin embargo significativamente menor al ser comparado con especies maderables empleadas para construcción (Navarro-Martínez *et al.* 2005; Serna-Mosquera *et al.* 2011) lo cual puede fundamentarse acorde a las características anatómicas de grosor en células. Adicionalmente es obtenido un RUM de 180.11 kg/cm².

Compresión Paralela

La determinación de esta prueba es importante ya que puede establecer la capacidad de carga de la madera al ser sometida a esfuerzos con respecto a la posición paralela de las fibras (Puertas *et al.*, 2013; Santillán-García, 2013; Fuentes-Salinas, 1998).

De acuerdo con la clasificación propuesta por la ASTM (Triana-Gómez *et al.*, 2008) el valor de Resistencia al límite proporcional (RLP) obtenido de

380.23 kg/cm² se encuentra de la categoría mediana, la cual comprende valores desde 301-450 kg/cm²; el valor correspondiente a la resistencia unitaria máxima (RUM) de 456.11 kg/cm² se encuentra dentro de la categoría mediana propuesta por la ASTM; a partir de los resultados obtenidos para RLP y RUM se establece que la madera presenta una resistencia media a medianamente alta cuando se encuentra sometida a esfuerzos en la dirección perpendicular; se identificó que la RLP fue inferior a la RUM, correspondiendo a un 83,4% de este; lo cual indica que la madera presenta un rango de compresión paralela alto con respecto al rango máximo que puede presentar la especie.

Cizallamiento

La prueba de cizallamiento establece la capacidad que tiene la madera para resistir el desplazamiento interno de una porción de la pieza con respecto a otra, a lo largo del grano (Kreschmann, 2010), en esta prueba se realizan dos fuerzas iguales y opuestas, que causan un esfuerzo para hacer deslizar las superficies adyacentes de una pieza de madera (Guevara, 2001). En esta prueba se relaciona la carga máxima o de rotura, sobre la superficie de falla, este esfuerzo es medido por el EUM (Esfuerzo Unitario Máximo); es importante conocer este valor, ya que nos guía hacia el uso estructural posible de la madera. El valor obtenido

para el tachuelo con relación al esfuerzo unitario máximo fue de 146.78 kg/cm², valor categorizado dentro de la presencia de una resistencia alta a la cizalladura (Triana- Gómez *et al.*, 2008), lo cual establece que la madera presenta una alta resistencia a que la madera se desplace con respecto a la porosidad o anillos de crecimiento, presentando así condiciones de resistencia cuando se encuentra sometida a esfuerzos en la dirección perpendicular.

Usos Potenciales

Teniendo en cuenta la caracterización anatómica y propiedades físico-mecánica que se evaluaron a la madera de tachuelo, se cataloga como importante dentro del diseño de estructuras como traviesas, vigas, columnas, durmientes, entre otras. Teniendo en cuenta lo anterior y la revisión de literatura para la determinación de los usos potenciales, se puede considerar a esta madera como un potencial sustituto maderable de especies como *Iryanthera ulei* Warb. y *Mora oleífera* Ducke. ya que presentan propiedades físico-mecánicas similares que permitirían establecer un reemplazo potencial. Es importante resaltar la importancia de especies alternativas que permitan reducir el impacto que se ejerce actualmente sobre maderas altamente comercializadas como es en este caso *Mora oleífera*, la cual se encuentra catalogada dentro de las especies maderables amenazadas en Colombia presente dentro del libro rojo de maderas de Colombia.

Tabla 4

Propiedades físico-mecánicas de especies con comportamiento similar a *Z. rhoifolium*. D.B: Densidad básica; Tan: Tangencial; Ext: Extremos; Perp: Perpendicular; Para: Paralela; Ciza: Cizallamiento.

Especie	Cita	D.B. g/cm ²	Dureza		Flexión		Compresión		Ciza	
			Tan kg	Ext kg	RUM kg/cm ²	MOE tn/cm ²	Perp. RLP kg/cm ²	Para. RLP kg/cm ²	RUM kg/cm ²	EUM kg/cm ²
<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>	Autores	0.607	634.39	569.86	1254.02	170.65	773.93	149.36	456.11	146.78
<i>Iryanthera ulei</i>	ITTO, 2021	0,609	597	777	1285	159,3	694,48	81,65	663	114,48
<i>Mora oleífera</i>	ITTO, 2021	0,63	595	707	1261	156	677	85	606	95
<i>Humiriastrum procerum</i>	ITTO, 2021	0,68	753	883	1354	174	694	94	694	146
<i>Pseudolmedia laviegata</i>	ITTO, 2021	0,64	818	936	1455	173	173	95	738	124

Como se puede observar en la tabla 4, además de los usos estructurales que se identifican para *Z. rhoifolium* también presenta aplicaciones importantes en la elaboración de pisos, estacas, tableros, herramientas agrícolas y puertas, permitiendo catalogar como un potencial sustituto para madera de especies como *Humirastrum procerum* y *Pseudolmedia laviegata* ya que poseen valores de dureza y densidades similares respecto a la madera que fue objeto de estudio; también se resalta que con los valores obtenidos para el volumen poroso señalan que esta madera se puede utilizar como un aislante térmico.

Conclusiones

El empleo de métodos no destructivos para la determinación de propiedades físicas y mecánicas que dejan de lado de forma significativa los residuos de madera cobra viabilidad para el caso de estudios enfocados a la determinación de usos potenciales, puesto que dejan en evidencia gran precisión y exactitud incluso comparados con los métodos destructivos.

El conocimiento de las propiedades físico-mecánicas de la madera permite establecer sustitutos maderables eventuales que permitan reducir el impacto que se produce sobre ciertas especies altamente comerciales. En este caso se encontró que la madera de *Z. rhoifolium* es un potencial sustituto para maderas de especies como *Mora oleífera*, *Humirastrum procerum*, entre otras.

Agradecimientos

Al Laboratorio de Maderas José Anatolio Lastra Rivera de la Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá, por permitir el desarrollo de los ensayos y manipulación de la madera.

A nuestra compañera Alejandra Acosta, por su apoyo y compañía en el desarrollo de este estudio.

A la profesora Nancy Pulido Rodríguez por su orientación y apoyo en el desarrollo de este estudio.

Referencias

- Acero, L., E., D. (2005). Plantas Útiles de la Cuenca del Orinoco. Exploration (Colombia) limited. Company, Ecopetrol.
- Aeberhard, R; et al (2013). Determinación del coeficiente de conductibilidad térmica de la madera de Algarrobo (prosopis). Grupo de Investigación de Energías Renovables (GIDER). Argentina.
- Alvis-Gordo, J. F.; Cabas-Giraldo, L. D. & Valencia-Ramos, D. P. (2017). PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA MADERA DE URACO (*Ocotea brevipetiolata* van der Werff), MUNICIPIO DE SIBUNDOY, PUTUMAYO. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 15(1), 66-75.
- Arena, F.; Andrés-Hernández, A.; Terrazas, T. y Castañeda, C. (2012). La madera de cinco especies de *Zanthoxylum* L. (RUTACEAE) con distribución en México. *Madera y bosques*, vol. 18, núm. 1, pp. 43-56. Xalapa. México.
- Baño, V.; Arguelles-Bustillo, R.; Regueira, R. & Guaita, M. (2012). Determinación de la curva tensión-deformación en madera de *Pinus sylvestris* L. para la simulación numérica de vigas de madera libre de defectos. *Materiales de Construcción*, vol. 62, núm. 306, pp. 269-284.
- Barría, C.; Sandoval, S. & Rojas, G. (2017). Uso del método de resistógrafo para la predicción de la densidad básica de la madera en árboles en pie de *Pinus radiata*. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, vol. 19, núm. 3, pp. 349- 362.
- Blanco, J. (2020). Caracterización de las 30 especies forestales maderables más movilizadas en Colombia provenientes del bosque natural. 2020. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Unión Europea. Colombia. Bogotá, 2020. Producto elaborado en el Marco del Convenio 481 de 2019, entre

- Minambiente-FAO para la Asistencia Técnica para la Implementación del Modelo de Forestería Comunitaria e impulso a la economía forestal.
- Calle, Z., Giraldo, E., Giraldo, A., Tafur, O., & Bolívar, J. (2014). *Gustos, percepciones y conocimiento local de los habitantes rurales de la cuenca media del río La Vieja (cuenca del río Cauca, Colombia), sobre 60 especies nativas de árboles, arbustos y palmas. Biota Colombiana, 15(2), 179–207.* <https://doi.org/10.21068/c001>.
- Cárdenas L., D. & N.R. Salinas (eds.). (2007). Libro rojo de plantas de Colombia. Volumen 4. Especies maderables amenazadas: Primera parte. Serie de libros rojos de especies amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI – Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 232 pp.
- COPANT, (1972). Comisión Panamericana de Normas Técnicas. Normas panamericanas. Buenos Aires. 584p.
- Coronel, E. O. (1989). *Variación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de especies nativas y cultivadas en el chaco argentino. Quebracho, 2, 14–20.*
- Dávalos-Sotelo, R. & Ordoñez-Candelaria, V. R. (2010). Influencia de los nudos sobre la resistencia en flexión estática en madera de tamaño estructural. *Revista mexicana de ciencias forestales*, vol. 2, núm. 7, pp. 43-56.
- Díaz, P.P. (2005). *Evaluación de propiedades físicas y mecánicas de madera de Nothofagus glauca (Hualo)*. Escuela de Ingeniería en industrias de la madera. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias forestales.
- Fuentes-Salinas, M. (1998). Propiedades tecnológicas de las maderas mexicanas, de importancia en la construcción. *Revista Chapingo, serie ciencias forestales y del ambiente*, vol. 4, núm. 1, pp. 221-229.
- García, L., & Romero, O. (2009). *Guía ilustrada para la descripción microscópica de la madera*. Bogotá: Jardín Botánico de Bogotá, José Celestino Mutis.
- Guevara, H. (2001). Propiedades físico - mecánicas de la madera. Bogotá D.C. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Pp. 64.
- Jansen, D., Kitin, P., De Pauw, H., Idris, M., Beeckman, H., & Smets, E. (1998). Preparation of wood specimens for transmitted light microscopy and scanning electron microscopy. *Belgian Journal of Botan*, 131(1), 41-49.
- Klinger, W., & Talero, Y. (2001). Propuesta metodológica para la identificación de usos potenciales de la madera a partir de parámetros fisiomecánicos cuantitativos. *Colombia forestal*, 7(14), 7-24.
- Kretschmann E. D. (2010). Mechanical Properties of Wood. In: *Wood Handbook: Wood as an engineering material*. Centennial Edition. Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin. U.S: Department of Agriculture.
- Lastra, J. A. (1986). Compilación de las propiedades físico-mecánicas y uso posible de 178 maderas de Colombia. Asociación Colombiana de ingenieros forestales (ACIF). Bogotá. P. 257.
- León, H. y Williams, J. (2005). ANÁLISIS PRELIMINAR SOBRE ANATOMÍA DEL LEÑO DE 11 ESPECIES DE LA TRIBU HELIANTHEAE (ASTERACEAE) DE LOS ANDES VENEZOLANOS. *Ernstia, vol. 17, núm. 2*. Caracas, Venezuela.
- León, W. J. (2015). Anatomía de la madera de 87 especies de la Reserva Forestal Ticoporo (Barinas, Venezuela). *Pittieria*, 39, 107-169.
- León, H. y Williams, J. (2006). Anatomía de la madera de 13 especies del orden Sapindales que crecen en el Estado Mérida, Venezuela. *Acta Botánica Venezolánica, vol. 29, núm. 2, 2006, pp. 269-296*. Fundación Instituto Botánico de Venezuela Dr. Tobías Lasser. Caracas, Venezuela.
- Loureiro, A. A., Vasconcelos, F. J., & Albuquerque, B. W. (1981). Anatomía do lenho de 4 especies de *Zanthoxylum* Linnaeus (Rutaceae) da Amazônia. *Acta Amazônica*, 14(4), 809-820.
- Medina, A.A.; Manzione, P.; Baucis, A.G.; Catalán, M.A.; Laffitte, L. & Andía, I.R. (2020). Propiedades mecánicas de la madera de álamos de cortinas

- forestales de Río Negro, Patagonia, Argentina. RIA. Revista de investigaciones agropecuarias, 46(2), 203-207.
- Montaño-Arias, S. A.; Camargo-Ricalde, S. L. y Grether, R. (2016). Anatomía de la madera de tres especies de *Mimosa* (Leguminosae-Mimosoideae) distribuidas en México. *Madera y bosques*, vol. 22, núm. 1, pp. 191-202. Xalapa, México.
- Navarro-Martínez, J.; Borja-de la Rosa, A. & Machuca-Velasco, R. (2005). Características tecnológicas de la madera de palo morado (*Peltogyne mexicana* Martínez) de tierra colorada, Guerrero, México. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, vol. 11, núm. 1, pp. 73-82.
- Noss, R. F. (1990). Indicator for monitoring biodiversity: A hierarchical approach. *Conservation Biology*, vol. 14, núm. 4, pp. 335-364.
- Pino-Rodríguez, A. T.; Vásquez-Aguilera, Y. & Polanco-Tapia, C. (2007). Influencia del contenido de humedad de equilibrio en adsorción y desorción sobre la dureza de cuatro especies maderables plantadas en Colombia. *Colombia Forestal*, vol. 10, núm. 20, pp. 226- 238.
- Puertas, P., Guevara, C., & Espinoza, M. (2013). Utilización industrial y mercado de diez especies maderables potenciales de bosques secundarios y primarios residuales. Lima, Perú: Asociación para la Investigación y Desarrollo Integral.
- Ramírez, M. V.; Valenzuela, L. H. & Díaz, C. S. (2001). Propiedades mecánicas en flexión de la madera de *Pinus radiata*, creciendo en un sistema silvopastoril. I: Elasticidad y resistencia. *Maderas, Ciencia y tecnología*, vol. 3, núm. 1, pp. 35-43.
- Romero, P. (2014). Análisis de la Porosidad de la Madera. Universidad Pontificia de Comillas y Ecole Centrale de Paris – ICAI.
- Rodriguez-Anda, R.; Ramírez-Arango, A. M.; Palacios-Juárez, H.; Fuentes-Talavera, F. J.; Silva-Guzmán, J. A. & Saucedo- Corona; A. R. (2015). Características anatómicas, físico-mecánicas y de maquinado de la madera de mezquite (*Prosopis velutina* Wooton). *Revista mexicana de ciencias forestales*, vol. 6, núm. 28, pp. 156-173.
- Roussy, L., Keil, G., Refort, M., Iaconis, A., & Abedini, W. (2013). Propiedades tecnológicas de la madera de *Citharexylum montevidense* (Spreng.) Mol. "Espina de bañado". *Quebracho*, 21(1,2), 58-66.
- Salgado, B., Pulido, E., Cabrera, M., Ruiz, C., & Paz, H. (2015). Protocolo para la medición de rasgos funcionales en plantas. En B. Salgado, *La ecología funcional como aproximación en el estudio, manejo y conservación de la biodiversidad: protocolos y aplicaciones* (págs. 37-79). Bogotá D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt.
- Sánchez C., L.M.; Botero E., J.E.; Vélez, J.G. (2007). Estructura, diversidad y potencial para conservación de los sombríos en cafetales de tres localidades de Colombia. *Cenicafé* 58(4), pp 304-323.
- Santillán-García, R. (2013). Determinación del módulo de elasticidad por vibraciones. Influencia de la relación longitud/altura. Máster en ingeniería de Montes. Escuela técnica superior de ciencias agrarias, Universidad de Valladolid.
- Sepúlveda, D.; Bustos, C.; Gacitúa, W.; Dechent, P. & Cloutier, A. (2013). Efecto del comportamiento termo-higrométrico a macroescala de madera bajo compresión perpendicular a la fibra en las propiedades nano mecánicas de su estructura celular. *Maderas, ciencia y tecnología*, vol. 15, núm. 2, pp. 205-222.
- Serna-Mosquera, Y. B.; Borja-de la Rosa, A.; Fuentes-Salinas, M. & Corona-Ambriz, A. (2001). Propiedades tecnológicas de la madera de algarrobo (*Hymenaea oblongifolia* Huber.) de Bagadó-Choco, Colombia. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, vol. 17, núm. 3, pp. 411-422. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.
- Solórzano, J. F., Suárez, S., & Mogollón, S. A. (2016). *Potencialidad de uso de la madera de 15 especies forestales, procedentes de la UOF Yará-Cagúan, departamento de Caquetá*. Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Téllez-Sánchez, C.; Herrera-Ferreira, M. & Rutiaga-Quíñones, J. G. (2009). Anatomía, física y

mecanica de la madera de Andira inermis (W. Wright) DC. (Leguminosae). Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestals y del ambiente, vol. 154, núm. 1, pp. 15-21.

Triana-Gómez, M. A.; González-Gladis, R. & Paspur-Posso, S. D. (2008). Estudio de las propiedades mecánicas de la madera de palosangre (*Brosimum*

rubescens Taub.), providencia: Leticia, Amazonas. Colombia Forestal, vol. 11, pp. 149-164.

Tsehay, A. & Walker, J. C. F. (1996). Spiral grain in canterburry *Pinus radiata*: within and between-tree variations and effect on mechanical properties. New Zealand Journal of Forestry Science, vol. 25, núm. 3, pp. 358- 366.