

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PALOSANGRE (*BROSIMUM RUBESCENS* TAUB.), PROCEDENCIA: LETICIA, AMAZONAS

Palabras clave: *Brosimum rubescens* Taub., palosangre, ensayos tecnológicos, madera, Amazonia, Colombia.

Key Words: *Brosimum rubescens* Taub., bloodwood, technological rehearsals, wood, Amazon, Colombia.

Max Alejandro Triana-Gómez¹
Gladis González Roso²
Segundo Demetrio Paspur Posso²

RESUMEN

Para realizar los ensayos tecnológicos de flexión estática, compresión paralela, cizallamiento paralelo tangencial, cizallamiento paralelo radial, impacto tangencial e impacto radial, en la madera de *Brosimum rubescens* Taub. (*Moraceae*) procedente de Leticia, Amazonas, se aplicaron las regulaciones de la Comisión Panamericana de Normas Técnicas COPANT. Se realizó el análisis estadístico de las muestras con base en la media aritmética y en la desviación estándar, mostrando su validez estadística por medio del análisis del coeficiente de variación. Los resultados se ajustaron al 12% de contenido de humedad y con base en ellos se calcularon los esfuerzos básicos. Las propiedades mecánicas de la madera se clasificaron y se determinaron sus posibles usos. La madera registró el mejor comportamiento al esfuerzo de flexión estática: según la clasificación ASTM, el Módulo de Elasticidad (MOE) y el Esfuerzo Unitario Máximo (EUM) se ubicaron en el rango muy alto y el Esfuerzo en el Límite Proporcional (ELP) en el Mediano. Le siguieron el de compresión paralela, cuyo EUM y ELP se localizaron en los rangos Alto y Mediano respectivamente, y el de cizallamiento tangencial, en el cual el EUM se ubicó en el rango Alto. El comportamiento menos favorable se presentó ante los esfuerzos de cizallamiento radial e impacto en los

planos tangencial y radial, cuyo EUM se ubicó en el rango Mediano. Se encontró que los usos más adecuados de la madera son: acabados interiores, acabados exteriores, artículos atléticos y deportivos, artesanías, cabos para herramientas, ebanistería, muebles, carretería, carrocerías, pilotes, instrumentos musicales, arcos para violín e instrumentos musicales similares, culatas para armas, estructuras, traviesas, quillas, pisos y vigas.

ABSTRACT

The technical recommendations of the Pan-American Committee of Technical Norms COPANT were applied for carrying out technological tests of tangential static flexion, parallel compression, tangential parallel shear, radial parallel shear, tangential impact, and radial impact in the wood of *Brosimum rubescens* Taub. (*Moraceae*) coming from Leticia, state of Amazonas, Colombia. The statistical analysis was made based on the arithmetic mean, the standard deviation and the variation coefficient to obtain representativeness. Results were adjusted to 12% of content of humidity. The mechanical properties of the wood were also classified, and its possible uses determined. The wood of *B. rubescens* exhibited the best response to the static flexion effort. According to the ASTM classification, the elasticity module (MOE) and the

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, mtriana@udistrital.edu.co.

² Universidad Distrital, Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, gladisii@gmail.com, segundopaspur@yahoo.com

Maximum Unitary Effort corresponded to the Very High range, while the Proportional Limit Effort to the Middle range. The Maximum Unitary Effort and Proportional Limit Effort obtained for the parallel compression were assigned to the High and Medium ranges, respectively, while the tangential shear matched the High range. The less favorable response was found for the radial shear effort and the impact in the tangential and radial planes that corresponded to the Medium range. It was found that the most appropriate uses of the wood were: interior finishes, external finishes, athletic and sport articles, handicrafts, ends for tools, joinery, furniture, chassis, piles, musical instruments, construction, arches for violin and similar musical instruments, breeches for weapons, structures, mischievous, keels, floors and beams.

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país que cuenta con numerosas especies maderables de gran importancia. Sólo en la Amazonia colombiana han sido identificadas 164 de uso actual o potencial (López & Cárdenas 2002), algunas de las cuales se encuentran amenazadas por uso no regulado. *Brosimum rubescens* Taubert (*Moraceae*) ha sido registrada para la Amazonia colombiana por distintos autores (e.g. Berg 1972, Acero 1979, Palacios 1999, López & Cárdenas 2002) y se destaca por su gran potencial económico debido a que su madera es ampliamente utilizada para la elaboración de artesanías por parte de colonos y comunidades indígenas de la región. Su distribución, de acuerdo con Rodríguez & Sibille (1996) y Berg (1972), es amplia para la cuenca amazónica, aunque también se ha encontrado en el suroeste de la Orinoquia.

B. rubescens es una especie muy conocida en la Amazonia colombiana como materia prima para la elaboración de artesanías e identificada como maderable de gran potencial económico en esta región; debido a esto, su demanda se ha venido acrecentando, comprometiendo la estabilidad de sus poblaciones naturales. En Colombia han sido estudiados aspectos de la especie como su ecología y fisiología (Palacios 1999, Palacios 2005, Arango 2004, Rivera *et al.* 2005, Triana *et al.* 2005). En

el tema específico de la madera, se han generado algunos estudios (Acero 1979, López & Cárdenas 2002) que han abordado sus propiedades físicas y han sugerido de forma preliminar algunos usos.

Por otro lado, los estudios tecnológicos de las maderas hacen un importante aporte al conocimiento de nuevas aplicaciones y usos, reduciendo sus posibilidades de subutilización. Los trabajos realizados sobre la especie *B. rubescens* dejan en evidencia la carencia de información en Colombia acerca de las propiedades mecánicas de su madera, pero, a la vez, informan sobre la creciente demanda de este recurso, lo cual hace aún más imperante la necesidad de adelantar el estudio de sus propiedades mecánicas, con miras a ampliar la base de conocimientos al respecto y propender por su uso racional.

El presente estudio se desarrolló en el marco del proyecto “Tecnología de la madera y bases silviculturales para el manejo y conservación del palosangre (*Brosimum rubescens*) en el trapezio amazónico” con el apoyo de Colciencias, el Sena y la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Su objetivo principal fue determinar las propiedades mecánicas de la madera de esta especie procedente de la localidad de Leticia, Amazonas, Colombia, y, con base en ello, establecer sus posibles usos.

CARACTERIZACIÓN DE LA ESPECIE

Sinónimos: *Alicastrum rubescens* (Taubert) Taubert, *Piratenia rubescens* (Taubert) Pittier, *Ferolia guianensis* Aublet, *Brosimum paraenses* Huber, *Brosimum angustifolium* Ducke, *Brosimum lancifera* Ducke.

Nombres comunes: Palosangre, palisangre, mirapiranga, granadillo, granadillo rosado, chimico, palo Brasil (Amazonia colombiana).

Nombres indígenas: Cárdenas & López (2002) reportan los siguientes nombres: tururi, pucu, kiritiño (huitoto); joofi (andoque), y karana (karijona). Acero (1979) reporta otros como: jaiveciide (muinane), ipguayoi (miraña), guasooge (tucano), chimico, vaco, doctoa (guanano).

Nombre comercial de la madera (Rodríguez & Sibille 1996): Satine satine (Guyana Francesa), satinewood (Guyana), palo de oro (España), bloodwood, cardinal wood (Inglaterra), amaparana, cundurú (Brasil), ferolia, legno satino (Italia).

Descripción botánica: Árbol monoico de fuste recto y cilíndrico, base en forma de pata de elefante. Puede alcanzar hasta 40 m de altura y 1 m de DAP. Corteza muerta rojiza con lenticelas dispuestas en líneas horizontales. La corteza viva es marrón, fibrosa, con exudado blanco en puntos, la albura es amarilla y el duramen rojizo. Hojas simples, alternas, dísticas, de cartáceas a subcoriáceas, de elípticas a oblongas, 6-9 cm de longitud por 2.5-3.5 cm de ancho, ápice acuminado, base aguda, haz glabra y envés esparcidamente pubescente a glabro, amarillento. Nervio central prominente por la haz, presenta de 10 a 22 venas secundarias, venas terciarias poco evidentes; estípulas envolventes, terminales, entre 0.2 y 0.8 cm de diámetro. Posee infrutescencias globosas, frutos drupáceos, que al madurar son de color verde amarillento claro, de sabor dulce, dispuestas en pares cada una de 1 a 3 cm de diámetro. El número de semillas por fruto varía entre 1 y 9 (Berg 1972). Acero (1979) describe la especie como un árbol con fuste cilíndrico de base recta. Corteza muerta rojiza, gruesa y con lenticelas en filas horizontales. Corteza viva anaranjada y fibrosa, madera de albura amarilla y duramen marrón. Con látex blanco. Hojas simples, alternas, dísticas, elípticas de 8 x 4 cm, envés amarillento. Con estípulas envolventes y terminales. Frutos drupáceos amarillos.

Distribución Geográfica: Berg (1972) afirma que la especie se distribuye a lo largo de la cuenca amazónica de Colombia, Perú, Brasil y Guayana, y existen también algunos reportes en Panamá. En la Amazonia colombiana la especie ha sido registrada por diferentes autores: Acero (1979) la reporta en el alto y bajo Vaupés, en el río Caguán, en el río Caquetá (Dos Islas) y en el departamento del Amazonas en la vía Leticia-Tarapacá. Por su parte López & Cárdenas (2002) la reportan en el medio Caquetá y en los alrededores de Araracuara (Caquetá), la Serranía de Taraíra, Mitú (Vaupés), Chiribiquete (Guaviare), río Puré, San Pedro de

Tipisca, Parque Nacional Natural Cahuinarí (Amazonas) y Orito (Putumayo). Existen registros a lo largo y ancho del sur del Trapecio amazónico, en el río Loreto Yacu, Puerto Nariño, Parque Nacional Natural Amacayacu, Macedonia, Nazareth y el sector de los kilómetros de la vía Leticia-Tarapacá (Palacios 1999). Rivera *et al.* (2005) colectaron algunos ejemplares de la especie en los kilómetros 6 y 22 de la vía Leticia-Tarapacá.

Hábitat: Se desarrolla en bosque húmedo tropical (bh-T) y en bosque muy húmedo tropical (bmh-T), crece sobre el plano sedimentario terciario en bosques de tierra firme y en bosques inundables (López & Cárdenas 2002). Acero (1979) afirma que *B. rubescens* es una especie que prospera en colinas bajas.

Usos: La especie tiene un alto valor para las comunidades indígenas de la Amazonia, entre otras razones por ser materia prima para la elaboración de artesanías (Acero 1979, López & Cárdenas 2002, Rivera *et al.* 2005). Este último reporta sobre las comunidades Ticuna y Huitoto en el sector sur del trapecio amazónico, que lo usan para la elaboración de instrumentos rituales y artesanías. Según Acero (1979) el látex de *Brosimum rubescens* es usado para mezclarlo con los de *Hevea guianensis* y *Couma macrocarpa* en la elaboración del “pendare” o caucho en bloques; de la madera afirma que es muy utilizada en la talla de arcos y artesanías en general. Kaiser (2006) informa sobre los siguientes usos: marquetería, instrumentos musicales, tacos de billar, baquetas para tambor, tubos para órgano, cajas decorativas, cofres y enchapes para pisos. En el ámbito artístico, afirma, se usa en barcos costumbristas y para labrar toda una serie de objetos y piezas de arte.

METODOLOGÍA

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Tecnología de Maderas José Anatolio Lastra Rivera de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá D.C. Para ellos se utilizó la máquina universal de ensayos Mohr & Federhaff A.G., con capacidad máxima de 6000 kg y los aditamentos respectivos necesarios para cada ensayo tecnológico. Sin embargo, el ensayo de compresión no se efectuó por razones logísticas.

Los aspectos metodológicos fundamentales para la presente investigación se basaron en la aplicación de las normas de la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT), algunos criterios de la American Society for Timber Materials (ASTM) y la aplicación del software generado para la *Propuesta metodológica para la determinación de usos potenciales de la madera, a partir de parámetros físico-mecánicos cuantitativos* (Klinger & Talero 2001), lo cual se detallará en los siguientes apartes.

SELECCIÓN Y COLECCIÓN DE LAS MUESTRAS

Se aplicaron las normas COPANT 458 y 459. Teniendo en cuenta los alcances del estudio, se estableció que la muestra debía proceder de 5 árboles adultos. La zona escogida correspondió a los alrededores de Leticia (kilómetro 6 de la vía Leticia-Tarapacá). Se verificó que los árboles cumplieran con requisitos tales como: buen porte, óptimo estado sanitario, DAP (Diámetro a la Altura del Pecho) mayor a 40 cm, altura comercial mayor a 10 m y escasa presencia de nudos. De cada uno se cortaron 4 piezas de madera de 2 m de longitud por 30 cm de ancho y 10-12 cm de espesor, de las cuales se seleccionaron 3 piezas al azar para un total de 15. La madera se transportó desde la ciudad Leticia hasta las instalaciones de la Universidad Distrital en Bogotá D.C., sede Vivero, previa aplicación de pintura de aceite

a cada extremo y recudimiento con plástico con el fin de minimizar su posible agrietamiento.

En la carpintería de la Universidad Distrital se extrajo de cada pieza un trozo de madera de 8 cm de espesor, de la cual se seleccionó al azar una vigueta de sección transversal de 8 x 8 cm. A partir de las viguetas seleccionadas se obtuvieron por cada ensayo 25 probetas correctamente orientadas, con el fin de seleccionar, para cada uno, 20 en óptimo estado. Éstas fueron dimensionadas de acuerdo con lo establecido por la norma COPANT correspondiente a cada ensayo tecnológico (Tabla 1).

ACONDICIONAMIENTO DE LA MADERA

Se aplicó parafina a ambos extremos de cada una de las probetas y se envolvieron en plástico con el fin de evitar la disminución acelerada del contenido de humedad, evitando así su agrietamiento.

ENSAYOS

Se realizaron los ensayos de flexión estática en el plano tangencial, compresión paralela al grano, cizallamiento en el plano tangencial, cizallamiento en el plano radial, impacto en el plano tangencial e impacto en el plano radial, aplicando las normas COPANT respectivas, como se observa en la Tabla 2.

Tabla 1. Especificaciones de las probetas utilizadas por ensayo (COPANT).

Ensayo	Dimensiones (cm)	Nº probetas	Estado
Dureza	5.0 x 5.0 x 15.0	20	Seco al aire
Compresión perpendicular	5.0 x 5.0 x 15.0	20	Seco al aire
Compresión paralela*	2.0 x 2.0 x 8.0	20	Seco al aire
Flexión estática tangencial	2.5 x 2.5 x 41.0	20	Seco al aire
Cizallamiento paralelo			
• Tangencial	5.0 x 5.0 x 6.5	20	Seco al aire
• Radial			
Impacto o tenacidad			
• Tangencial	2.0 x 2.0 x 30	20	Seco al aire
• Radial			

* Las dimensiones de las probetas utilizadas en el ensayo de compresión paralela se modificaron respecto a las que dicta la norma COPANT 464.

Tabla 2. Normas aplicadas.

Ensayo	Norma
Flexión estática tangencial	COPANT 555
Compresión paralela	COPANT 464
Cizallamiento radial	COPANT 463
Cizallamiento tangencial	
Impacto radial	COPANT 556
Impacto tangencial	

Fuente: Normas COPANT.

Las dimensiones de las probetas utilizadas en el ensayo de compresión paralela debieron ser modificadas con respecto a las que dicta la norma COPANT 464; esto se hizo con el fin de poder llevar a término dicho ensayo, ya que se detectaron algunas fallas en la capacidad de la máquina para realizarlo con las dimensiones reglamentarias. Finalmente, las dimensiones de las probetas se modificaron de 2.5 x 2.5 x 10 cm a 2.0 x 2.0 x 8.0 cm.

Los datos obtenidos en los diferentes ensayos fueron procesados mediante el programa Microsoft Excel, realizando los cálculos necesarios para la obtención de los módulos y esfuerzos, según lo dictan las normas antes mencionadas. Particularmente para los ensayos de flexión estática y compresión paralela se generaron, por cada probeta, las figuras carga vs. deformación, para deformación total y para deformación en el límite proporcional. Por medio de un análisis de regresión se obtuvo, para cada figura, la línea de tendencia y su ecuación correspondiente (Anexo 1). Posteriormente, mediante la derivación e igualación de las ecuaciones, se obtuvieron los valores de Carga en el Límite Proporcional (CLP) y Deformación en el Límite Proporcional (DLP), necesarios para el cálculo de algunos de los módulos.

AJUSTE DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

Para el presente estudio se hizo el ajuste a un contenido de humedad del 12%, como lo recomiendan las normas internacionales, utilizando las ecuaciones 1

y 2. Adicionalmente, se utilizaron los valores de corrección que se presentan en la Tabla 3.

$$V_a = V_i + \frac{(CH_i - 12) * (\%a) * (V_i)}{100}$$

Ecuación 1. (Tomada de Klinger 1994).

Donde:

V_a = Valor de la propiedad ajustado a un contenido de humedad del 12%.

CH_i = Contenido de humedad de la madera al momento de las pruebas.

%a = Porcentaje de aumento por cada 1% de CH.

V_i = Valor hallado en laboratorio para la propiedad.

Tabla 3. Aumento promedio de las propiedades mecánicas por cada 1% de variación en el contenido de humedad.

Ensayo	Módulo o esfuerzo	Corrección (%)
Flexión estática	EPL	5
	EUM	4
	MOE	2
Compresión paralela	EUM	5
	ELP	6
Cizallamiento paralelo	EUM	3
Impacto	EUM	0.5

Fuente: Lastra (1984).

PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Para cada ensayo se determinaron los parámetros estadísticos máximo, mínimo, media aritmética, desviación estándar y coeficiente de asimetría a los diferentes módulos y esfuerzos calculados. A partir de la desviación y la media aritmética se calculó el coeficiente de variación, como se indica en la ecuación 2.

$$CV = \frac{SX}{X}$$

Ecuación 2. (Tomada de Klinger 1994).

Donde:

Cv = Coeficiente de variación.

SX = Desviación estándar.

X = Media aritmética.

La idoneidad estadística de la muestra utilizada para cada ensayo se evaluó confrontando los coeficientes de variación calculados con los máximos valores admisibles según la ASTM (Tabla 4). De tal forma, cuando el coeficiente de variación sobrepasó el máximo valor admisible, se eliminaron los registros con valores máximos y mínimos, hasta lograrse un valor aceptable, conservando en todo caso el mínimo de datos para que la muestra fuera estadísticamente válida.

Tabla 4. Coeficientes de variación máximos admisibles para las propiedades evaluadas según ASTM.

Ensayo	Módulo o esfuerzo	Coeficiente de variación %
Flexión	Módulo de rotura o esfuerzo máximo	16
	Módulo de elasticidad	22
	Esfuerzo máximo	18
Compresión paralela	Límite proporcional	24
	Módulo de elasticidad	29
Cizallamiento paralelo	Esfuerzo máximo	14

Fuente: Norma ASTM D-2555-78.

CÁLCULO DE ESFUERZOS BÁSICOS

A partir de los valores medios obtenidos ajustados al 12% de contenido de humedad se obtuvieron inicialmente los valores mínimos probables (vp) para los esfuerzos y módulos calculados en los ensayos de flexión estática, compresión paralela y cizallamiento. La determinación de los vp se hizo siguiendo los criterios de distribución de la tabla *T-Student* y de distribución normal, como se indica en las ecuaciones 3 y 4.

$$VP = X - \frac{Sx * t}{\sqrt{n - 1}}$$

Ecuación 3. (Tomada de Klinger 1994).

$$VP = X - (Z * Sx)$$

Ecuación 4. (Tomada de Klinger 1994).

Donde:

X = Media aritmética del esfuerzo.

Sx = Desviación estándar con respecto a la media.

t = Valor obtenido de la tabla de distribución de *T-Student*, con n-1 grados de libertad y 95% de probabilidad.

n = número de datos.

Z = Valor de la tabla de distribución normal, con 95 % de probabilidad.

Finalmente, a cada vp se le aplicó el valor de ajuste respectivo, como se indica en la Tabla 5, obteniendo así los esfuerzos básicos correspondientes.

Tabla 5. Factores de ajuste utilizados para el cálculo de esfuerzos básicos.

Esfuerzo o módulo	Factor de ajuste
Módulo de elasticidad a flexión	1.61
Esfuerzo de rotura a flexión	3.39
Esfuerzo de rotura a compresión paralela	3.06
Carga máxima a cizallamiento	6.61

Fuente: Normas ASTM.

CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA

La caracterización de las propiedades mecánicas de la madera se llevó a cabo teniendo en cuenta la clasificación propuesta por las normas ASTM, cuyos rangos por propiedad se pueden ver en la Tabla 6.

USOS POTENCIALES

La determinación de usos potenciales se realizó siguiendo la metodología propuesta por Klinger & Talero (2001), la cual se fundamenta en las propiedades físicas y mecánicas de cada madera. Inicialmente, los valores medios obtenidos de cada ensayo de laboratorio fueron ajustados al 0% de contenido de humedad, según lo requiere esta metodología.

Tabla 6. Clasificación de las propiedades mecánicas evaluadas, según ASTM.

Clasificación	Muy bajo	Bajo	Mediano	Alto	Muy Alto
Flexión (kg/cm ²). Esfuerzo L.P.	250	252 – 500	501 – 750	751 – 1000	1001
Flexión (kg/cm ²). Módulo de rotura.	400	401 – 900	901 – 1350	1351 – 1800	1801
Flexión (1000 kg/cm ²). Módulo de elasticidad.	70	71 – 100	101 – 150	151 – 200	201
Compresión paralela (kg/cm ²). Esfuerzo en L.P.	200	201 – 300	301 – 450	451 – 600	601
Compresión paralela (kg/cm ²). Módulo de rotura.	300	301 – 450	451 – 700	701 – 950	951
Cizallamiento (kg/cm ²).	40	41 – 85	86 – 120	121 – 175	176
Tenacidad o impacto (m.kg.cm ²).	0.19	0.25 – 0.60	0.61 – 1.0	1.01 – 1.4	1.41

Fuente: Lastra (1986).

Posteriormente, se realizó la consulta de las diferentes propiedades mecánicas en la base de datos, utilizando los rangos de consulta propuestos por Cifuentes *et al.* (2005), Tabla 7. Con base en estos listados de especies con propiedades mecánicas similares se evaluaron los usos correspondientes, para asignar los de la especie en estudio.

Tabla 7. Rangos de búsqueda para cada propiedad.

Propiedad	Rango
Densidad	Media - 0.01, media + 0.01
Flexión estática	Media -10, media + 10
Compresión perpendicular	Media -25, media + 25
Compresión paralela	Media -10, media + 10
Cizallamiento	Media -1, media + 1
Dureza	Media -10, media +10
Impacto	Media – 0.1, media + 0.1

Fuente: Cifuentes, Medina y Polanco (2005).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PROPIEDADES MECÁNICAS

Se hizo el análisis de resultados de cada una de las propiedades mecánicas evaluadas, cuyos datos se presentan de manera resumida en el Anexo 2.

FLEXIÓN ESTÁTICA

La madera registró un excelente comportamiento en este ensayo. El alto valor del Módulo de elasticidad (MOE) y del Esfuerzo Unitario Máximo (EUM) sugieren una madera altamente rígida y apta para soportar grandes esfuerzos cuando está sometida a flexión, por ejemplo cuando forma parte de una estructura como viga u otro elemento que cumpla con la misma función. Como es evidente en la Figura 1, el esfuerzo en el límite proporcional mostró un valor muy inferior al del esfuerzo en la carga de rotura o EUM. El valor medio de aquel corresponde al 29.3% del EUM, lo cual indica que la madera tiene un rango de elasticidad pequeño con respecto al rango de plasticidad.

En cuanto a los contenidos de humedad, la gran mayoría de pobretas presentaron valores superiores al 12% al momento de la prueba. Esto ocasionó que al ser ajustados los esfuerzos al 12% se registraran valores inferiores debido a la influencia de esta variable en las propiedades mecánicas de la madera.

Al evaluar estadísticamente la muestra, presenta un coeficiente de variación muy aceptable, ya que tanto el Módulo de Elasticidad como el Esfuerzo unitario máximo fueron inferiores a los máximos admisibles. Para el caso, el MOE fue de 14.85, siendo el admisible de 22, y para el EUM de 13.55 y 16 respectivamente. Todos los datos fueron aceptados,

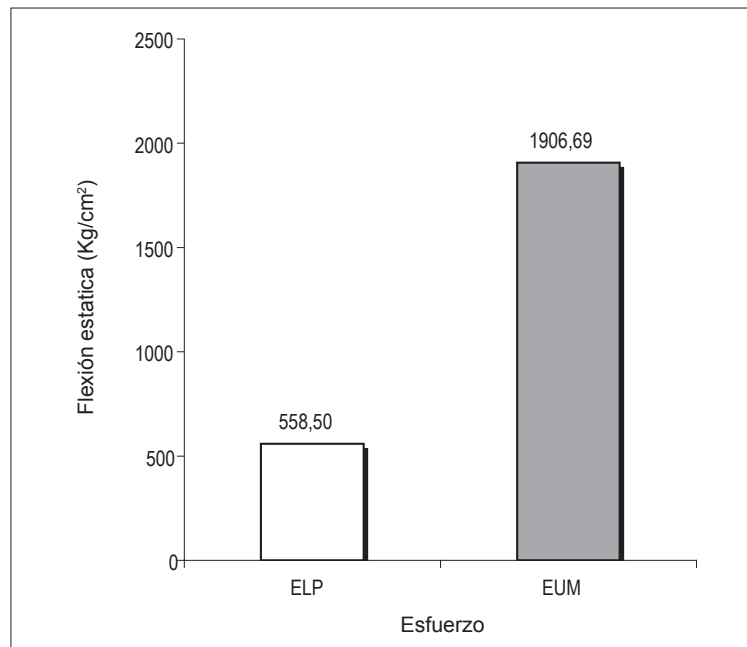


Figura 1. Comparativo para la flexión estática del Esfuerzo en el Límite Proporcional (ELP) vs. Esfuerzo de Carga (EUM).

lo cual indica que la muestra es confiable y por lo tanto los resultados arrojados por ella.

Por el comportamiento de la madera en esta prueba puede decirse que se asemeja a las siguientes especies conocidas comercialmente: *Humiriastrum procera* (Cahnul), *Humiria balsamifera* (Oloroso), *Tabebuia serratifolia* (Tahuari, Gauayacán) y *Goupia glabra* (Chaquiro). Según la Norma ASTM, los esfuerzos evaluados en este ensayo se ubicaron en los rangos de Mediano y Muy alto.

COMPRESIÓN PARALELA

La respuesta de la madera al esfuerzo de compresión paralela fue buena. El esfuerzo Unitario Máximo indica que la madera es altamente resistente cuando se encuentra sometida a esfuerzos de compresión paralela, por ejemplo cuando es utilizada como columna en una estructura. En cuanto al módulo de elasticidad, el comportamiento fue similar al de la prueba de flexión estática y a su vez fue inferior. Al igual que en la prueba de flexión estática, el Esfuerzo en el Límite Proporcional fue inferior al Esfuerzo Unitario Máximo, pues correspondió al 43% de éste (Figura 2).

En este ensayo también se hizo evidente la influencia del contenido de humedad en la resistencia de la madera. Las probetas registraron contenidos de humedad por debajo del 12% y, por tanto, al ajustar los resultados al 12%, los valores para los diferentes esfuerzos fueron mayores que los registrados en laboratorio. En el análisis estadístico, fue necesario rechazar 3 datos extremos, ya que afectaban notoriamente el coeficiente de variación de la muestra. Finalmente, con los datos aceptados, se registraron tanto para Esfuerzo en el Límite Proporcional como para Esfuerzo Unitario Máximo coeficientes de variación aceptables (21.67 y 8.92) respectivamente.

De acuerdo al comportamiento de la madera en esta prueba, se asemeja a las siguientes maderas: *Pouteria* sp. (Caimo) y *Heterostemon vageleri* (Guamo rosado).

CIZALLAMIENTO

Respecto a las dos pruebas antes mencionadas, la madera registró un comportamiento menos favorable, aunque su respuesta sigue siendo buena. Se presentaron diferencias en el valor medio del EUM dependiendo del plano de aplicación de la carga. Como se puede

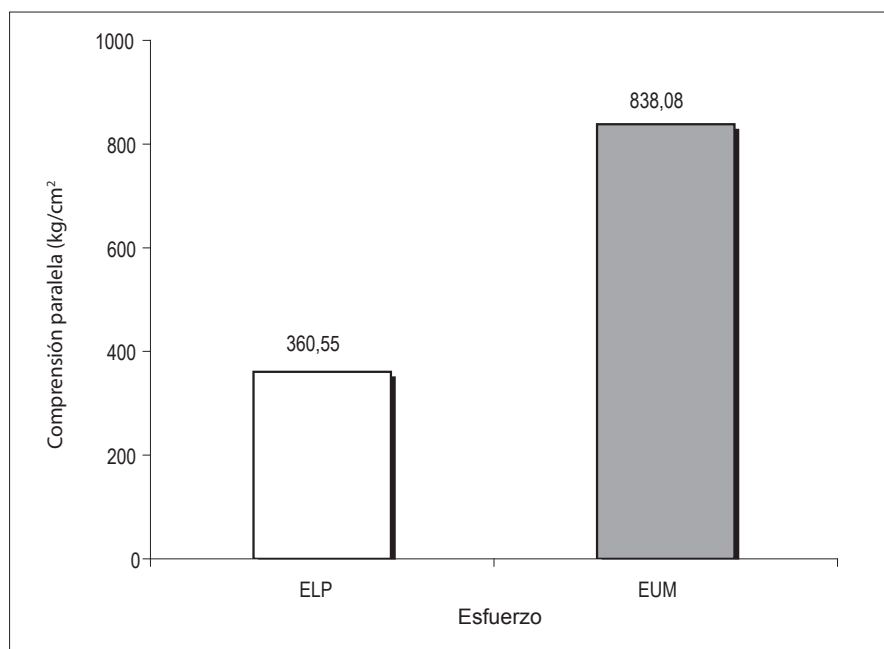


Figura 2. Comparativo para compresión paralela del Esfuerzo en el Límite proporcional (elp) vs. Esfuerzo de Carga (emu).

observar en la Figura 3, el Esfuerzo Unitario Máximo fue mayor cuando la carga se aplicó en plano tangencial, superando en un 8% al EUM en el plano radial. Esto hizo que, al clasificar esta propiedad, cada uno se ubicara en un rango diferente.

IMPACTO

En general, el comportamiento menos favorable lo tuvo la madera en el ensayo de impacto. De igual forma que en el ensayo de cizallamiento, la madera

tuvo mejor respuesta cuando la carga se aplicó en el plano tangencial, superando al EUM en el plano radial en un 21.5 % (Figura 4); los valores medios indican que la madera es medianamente resistente a estos esfuerzos, por lo cual debe manejarse con precaución al ser sometida a usos que demanden alta resistencia al impacto.

En el caso del cizallamiento tangencial, 17 de los 20 datos de la muestra fueron validados, con lo cual la muestra generó un coeficiente de variación

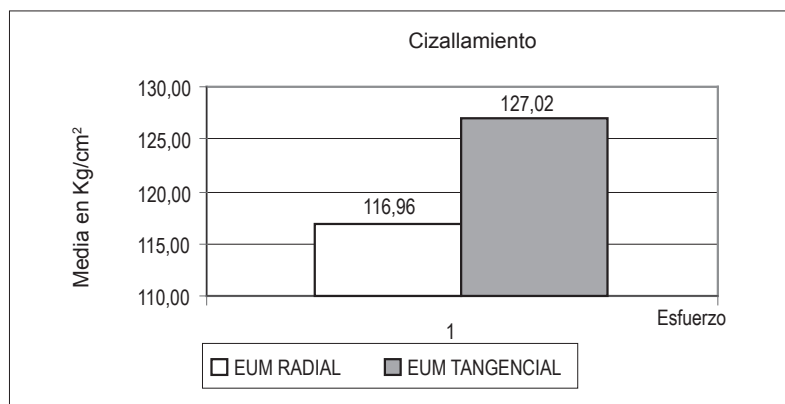


Figura 3. Comparativo para cizallamiento del Esfuerzo en el Límite Proporcional (ELP) vs. Esfuerzo de Carga (EMU).

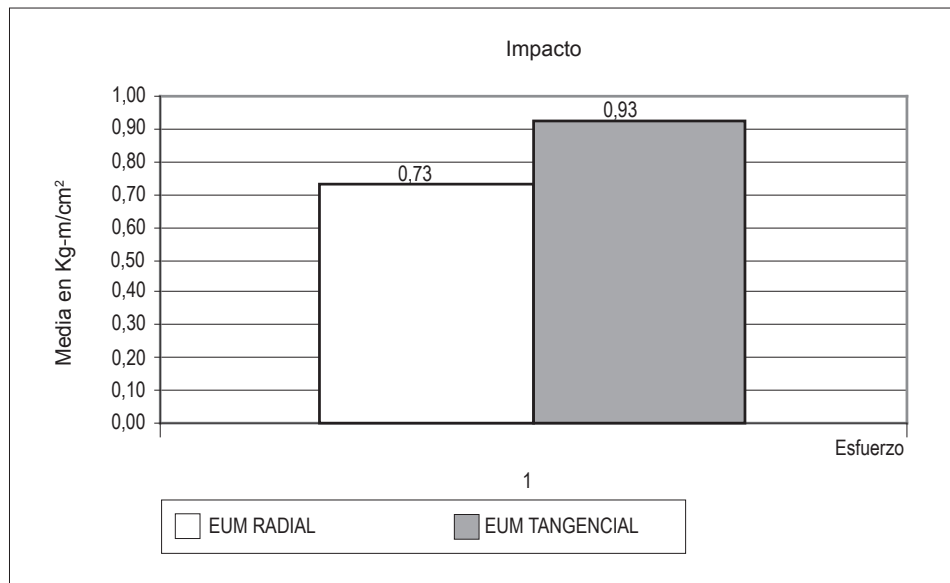


Figura 4. Comparativo para impacto del Esfuerzo en el Límite Proporcional (ELP) vs. Esfuerzo de Carga (EMU).

aceptable en cuanto al EUM (12.76 cuando el máximo admisible es 14) y puede decirse que en general los datos tuvieron un comportamiento homogéneo. Para el impacto radial, fueron validados 16 de los 20 datos, generando un coeficiente de variación de 13.51 cuando el admisible es 14. Esto indica que el ensayo estuvo dentro del margen de confiabilidad y por lo tanto sus resultados son aplicables.

CLASIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE *B. RUBESCENS*

Los valores medios para cada propiedad según la clasificación propuesta por la ASTM se ubicaron en los rangos de Mediano, Alto y Muy alto, como puede observarse en la Tabla 8.

Tabla 8. Clasificación de las propiedades mecánicas de *B. rubescens* con base en las normas ASTM.

Propiedad	Variable	Media (CH = 12%)	Clasificación ASTM
FLEXIÓN ESTÁTICA PLANO TANGENCIAL	ELP (kg/cm²)	558.50	MEDIANO
	EUM (kg/cm²)	1906.69	MUY ALTO
	MOE (1000 kg/cm²)*	213.43	MUY ALTO
COMPRESIÓN PARALELA	EUM (kg/cm²)	838.08	ALTO
	ELP (kg/cm²)	360.55	MEDIANO
CIZALLAMIENTO PLANO TANGENCIAL	EUM (kg/cm²)	127.02	ALTO
CIZALLAMIENTO PLANO RADIAL	EUM (kg/cm²)	116.96	MEDIANO
IMPACTO PLANO TANGENCIAL	EUM (m-kg/cm²)	0.92	MEDIANO
IMPACTO PLANO RADIAL	EUM (m/kg/cm²)	0.73	MEDIANO

Fuente: Estudio.

Tabla 9. Esfuerzos básicos para *B. rubescens* hallados mediante distribución T-Student al 12% de contenido de humedad.

Propiedad	Variable	Parámetro						
		(N)	Media	D.Est.	C. V.	(C.V.)	V.P.	E.B.
FLEXIÓN ESTÁTICA TANGENCIAL	EUM (kg/cm ²)	20	1906.69	258.42	13.55	16	1782.60	525.84
	MOE (kg/cm ²)	20	213.43	31.60	14.81	22	198.26	123.14
COMPRESIÓN PARALELA	EUM (kg/cm ²)	17	838.08	74.38	8.88	18.00	799.15	261.16
CIZALLAMIENTO TANGENCIAL	EUM (kg/cm ²)	17	127.02	16.21	12.76	14	118.54	17.93
CIZALLAMIENTO RADIAL	EUM (kg/cm ²)	16	116.96	15.80	13.51	14.00	108.42	16.40

Fuente: Estudio.

ESFUERZOS BÁSICOS

Con base en los valores probables se obtuvieron los siguientes esfuerzos básicos en las propiedades evaluadas (Tabla 9).

MADERAS POTENCIALMENTE SUSTITUTAS

Existen algunas maderas en Colombia que por su similitud en las propiedades mecánicas con *B. rubescens* podrían sustituir eventualmente a ésta en un uso determinado. Con el fin de dar otras opciones se presenta un listado detallado (Anexo 3) con sus propiedades reportadas al 0% de contenido de humedad. En la Tabla 10 se pueden observar las propiedades de *B. rubescens* ajustadas al 0% de contenido de humedad, con base en lo cual se

realizó su comparación con especies de propiedades similares, las cuales fueron tomadas de los listados generados por Klinger & Talero (2001).

USOS POSIBLES

Con base en lo anterior, es posible definir usos de interés para la industria, como acabados interiores, acabados exteriores, artículos atléticos y deportivos, ebanistería, muebles, instrumentos musicales, construcciones estructurales, arcos para violín y similares, culatas para armas, traviesas, quillas y pisos.

CONCLUSIONES

Los resultados que se presentaron para la madera de *B. rubescens* en los esfuerzos de flexión estática, compresión paralela y cizallamiento en el plano

Tabla 10. Propiedades mecánicas de *B. rubescens* reportadas al 0% de contenido de humedad.

Ensayo	Variable	Media 0%
FLEXIÓN ESTÁTICA TANGENCIAL	ELP (kg/cm ²)	893.60
	EUM (kg/cm ²)	2821.89
	MOE (kg/cm ²)	264.65
COMPRESIÓN PARALELA	EUM (1000 kg/cm ²)	1441.49
	ELP (kg/cm ²)	576.88
CIZALLAMIENTO TANGENCIAL	EUM (kg/cm ²)	172.75
CIZALLAMIENTO RADIAL	EUM (kg/cm ²)	159.07
IMPACTO TANGENCIAL	EUM (m/kg/cm ²)	1.26
IMPACTO RADIAL	EUM (m/kg/cm ²)	0.99

Fuente: Estudio.

tangencial son coherentes con el alto peso específico reportado por otros estudios (Acero 1979, CIRAD 2003), lo cual confirma la relación directa que existe entre esta propiedad física y las propiedades mecánicas de la madera.

Los valores registrados por la madera para el EUM en los ensayos de cizallamiento e impacto concuerdan con la literatura en afirmar que ésta es significativamente más resistente en el plano tangencial que en el plano radial, lo cual está fuertemente relacionado con el agrietamiento presentado por la madera en tanto adquiere su contenido de humedad de equilibrio.

El buen comportamiento registrado por la madera de la especie estudiada, en todas las pruebas excepto en la de impacto, es coherente con su tipo de grano, que según CIRAD (2003) es recto, lo cual favorece a la mayoría de las propiedades mecánicas de la madera.

En la adopción de nuevos o potenciales usos para *B. rubescens* se debe tener en cuenta que la resistencia al impacto es apenas media y se tienen pocas evidencias sobre las pruebas de dureza, por lo tanto es recomendable orientar la madera hacia los demás usos que no demanden un excelente comportamiento ante dichos esfuerzos.

Los usos potenciales hallados para la madera de *B. rubescens* en el presente estudio concuerdan con varios de los hallados por Acero (1979) con base en la densidad anhidra y con los reportados por Kaiser (2003). Sin embargo, con la metodología aquí empleada se encontró un mayor número de usos posibles, en su mayoría orientados a la industria, incorporando usos que trascienden la elaboración de manualidades y/o artesanías.

Existen maderas de tipo comercial que por sus propiedades mecánicas podrían sustituir en determinados usos a la de *B. rubescens*, aún así, su color, lustre y veteado continúan siendo una ventaja comparativa a potenciar. Los resultados obtenidos por los trabajos precedentes del proyecto Colciencias-Sena-Universidad Distrital muestran que esta especie presenta posibilidades para el manejo forestal

permanente a largo plazo e interesantes posibilidades de industrialización.

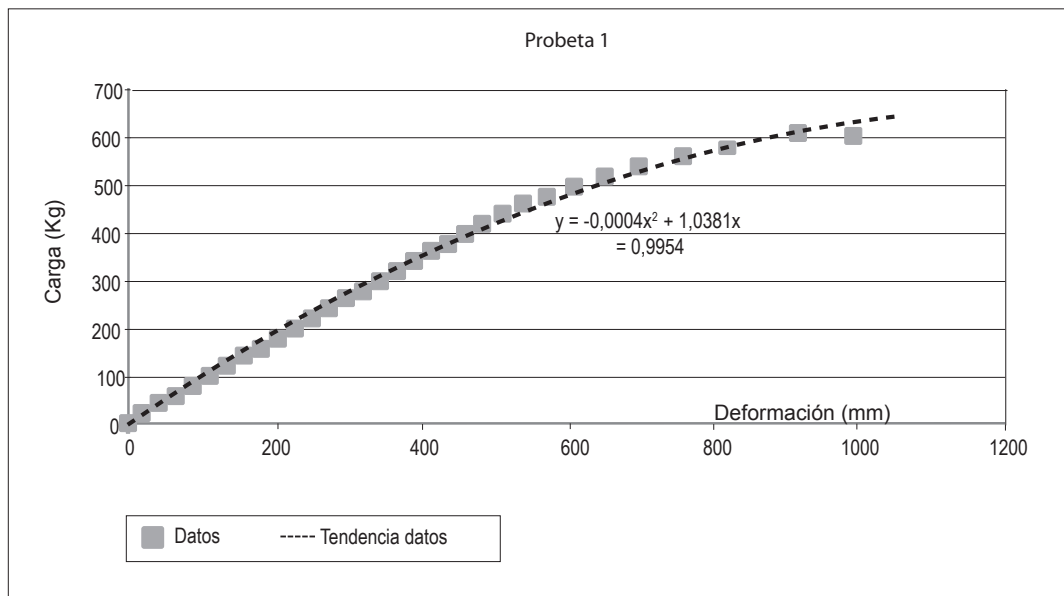
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acero, L. E.** 1979. Principales plantas útiles de la Amazonia colombiana. Proyecto Radargramétrico del Amazonas. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. Pg. 256.
- Arango, L.** 2002. Caracterización comparativa de la estructura poblacional y el patrón de distribución de *Brosimum rubescens* Taubert, *Moraceae*, en dos unidades fisiográficas del trapezio amazónico. Tesis de grado para optar al título de ecólogo. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Estudios Ambientales y Rurales. Carrera de Ecología. Bogotá. Pg. 70.
- American Society for Testing and Materials.** 1975. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, United States. Pg. 952.
- Berg, C. C.** 1972. Flora Neotrópica. Hafner Publishing Company. Monograph 7. New York. Pg. 366.
- Cifuentes, F. A., J. H. Medina & C. Polanco.** 2005. Estudio de las propiedades físicas y mecánicas de *Eucalyptus tereticornis* y *Tectona grandis*, procedencia Monterrubio, Magdalena. Tesis de grado. Ingeniería Forestal. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Bogotá. Pg. 85.
- Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD).** Febrero de 2003. Satine: *Brosimum rubescens*. En: TROPIC 3.1. (23). CIRAD. Forestry Department [disponible en: <http://tropix.cirad.fr/02-2003>].
- Comité Panamericano de Normas Técnicas (COPANT).** 1969. Normas técnicas COPANT. Buenos Aires. Pg. 36.
- Kaiser, J. A.** 2006. Wood of The Month: Bloodwood is Very Hard, Very Tough and Very Red. En: Wood and Wood Products [disponible en: www.woodweb.com/Resources/RSNews-stand02.html].

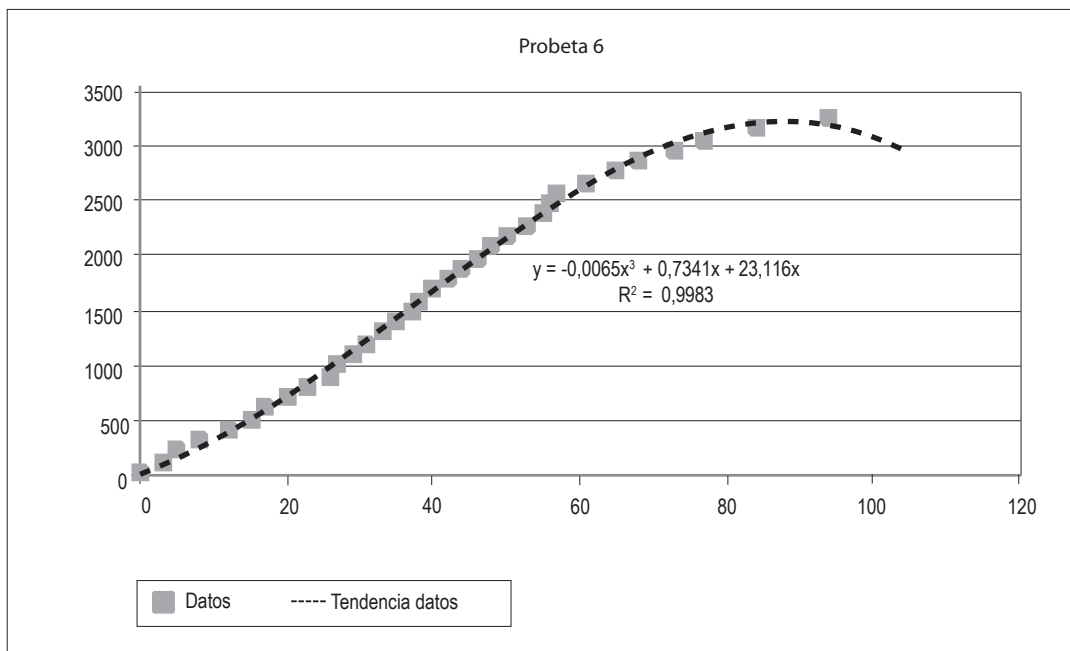
- Klinger, W.** 1994. Propiedades mecánicas y aplicaciones estructurales de la madera. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. Pg. 22.
- Klinger, W. & Y. Talero.** 2001. Propuesta metodológica para la determinación de usos potenciales de la madera a partir de parámetros físico-mecánicos cuantitativos. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. Pg. 156.
- Lastra, J. A.** 1984. Aspectos generales sobre la estructura anatómica, propiedades físicomecánicas y secado de la madera. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. Pg. 48.
- Lastra, J. A.** 1986. Compilación de las propiedades físico-mecánicas y usos posibles de 178 maderas de Colombia. Asociación Colombiana de Ingenieros Forestales (ACIF). Bogotá. Pg. 257.
- López, R. & D. Cárdenas.** 2002. Manual de identificación de especies maderables objeto de comercio en la Amazonia colombiana. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI). Bogotá. Pg. 98.
- Palacios, P. A.** 1999. Valoración de la oferta ambiental de palosangre (*Brosimum rubescens* Taubert) como especie promisoría en la elaboración de artesanías, en el sur del Trapecio Amazónico. Proyecto COLCIENCIAS (manuscrito). Pg. 75.
- Palacios, P. A.** 2005. Estructura y patrón de distribución de las poblaciones de *Brosimum rubescens* (Taub) en los paisajes del sur del Trapecio Amazónico. Tesis de maestría en estudios amazónicos. Universidad Nacional de Colombia, Sede Leticia. Pg. 89.
- Rivera L., J. López & M. Triana.** 2005. Efecto del sombreado en vivero en el crecimiento y mortalidad de plántulas de regeneración natural de palosangre (*Brosimum rubescens* Taub.) en el sur del Trapecio Amazónico. Revista Colombia Forestal 9 (18): 94-105.
- Rodríguez M. & A. M. Sibile.** 1996. Manual de identificación de especies forestales de la subregión andina. Proyecto PD 150/91. Rev. 1 (1). INIA-OIMT. Universidad de la Molina. Lima. Pg. 489.
- Triana M., J. López & L. Rivera** 2005. Algunos efectos de la extracción de palosangre (*Brosimum rubescens* Taub.) en un bosque ubicado entre el km 6 y km 12 costado oriental de la vía Leticia-Tarapacá. Revista Colombia Forestal 9 (18): 35-48.

ANEXO 1

Análisis de regresión para el ensayo de flexión estática.



Análisis de regresión para el ensayo de compresión paralela.



ANEXO 2

Resumen de propiedades mecánicas de *B. rubescens* al 12% de contenido de humedad.

Propiedad	Variable	Parámetro								
		N	(N)	Máximo	Mínimo	Media	D.Est.	C. As.	CV	(CV)
FLEXIÓN ESTÁTICA TANGENCIAL	ELP (kg/cm ²)	20	20	827.94	206.95	558.50	151.50	-0.62	27.13	-----
	EUM (kg/cm ²)	20	20	2361.30	1458.73	1906.69	258.42	-0.28	13.55	16
	MOE (kg/cm ²)	20	20	296.20	171.58	213.43	31.60	0.63	14.81	22
COMPRESIÓN PARALELA	EUM (kg/cm ²)	20	17	955.01	708.26	838.08	74.38	-0.35	8.88	18.00
	ELP (kg/cm ²)	20	17	457.63	224.74	360.55	79.83	-0.76	22.14	24.00
CIZALLAMIENTO TANGENCIAL	EUM (kg/cm ²)	20	17	169.49	109.55	127.02	16.21	1.58	12.76	14
CIZALLAMIENTO RADIAL	EUM (kg/cm ²)	20	16	159.06	98.74	116.96	15.80	1.34	13.51	14.00
IMPACTO TANGENCIAL	EUM (kg-m/cm ²)	20	18	1.06	0.70	0.93	0.10	-0.68	10.71	30
IMPACTO RADIAL	EUM (kg-m/cm ²)	20	18	0.86	0.56	0.73	0.09	-0.33	12.56	30

N = Número de probetas usadas en el ensayo.

(N) = Número de probetas usadas para el análisis estadístico.

Máximo = Valor máximo de la muestra.

Mínimo = Valor mínimo de la muestra.

Media = Valor promedio de la muestra al 12% de contenido de humedad.

D. Est. = Desviación estándar respecto a la media.

C.As = Coeficiente de asimetría.

CV = Coeficiente de variación de la muestra.

(CV) = cv máximo admitido según norma ASTM.

ANEXO 3

Especies potencialmente sustitutas por flexión y sus principales propiedades reportadas al 0% de contenido de humedad.

Nombre científico	Nombre común	Densidad anhidra (gr/cm ³)	RUM Flexión (kg/cm ²)	MOE Flexión (1000 kg/cm ²)	RUM Compresión paralela (kg/cm ²)	RUM Cizallamiento (kg/cm ²)	RUM Impacto (kg-/cm ²)
<i>Chaetocarpus chomburgkianus</i>	Cacho	0.94	2255.48	270.32	1444.8	0	0
<i>Dipterix</i> sp.		0.93	2333.96	262.88	1492.8	0	0
<i>Enterolobium schomburgkii</i>	Curarina	1.0	2277.72	271.56	1481.6	185.6	2.13
<i>Eschweilera pitieri</i>	Coco manteco	0.96	2840.12	269.08	1366.4	193.6	1.76
<i>Eschweilera</i> sp.	Coco mono	0.94	2890.44	274.04	1568.0	0	0
<i>Goupia glabra</i>	Chaquiro	0.85	2625.52	274.04	1470.4	225.6	1.0
<i>Humiria balsamifera</i>	Oloroso	0.87	2656.6	256.68	1292.8	235.2	1.06
<i>Humiriastrum procera</i>	Chanul	0.79	2521.92	269.08	1411.2	196.8	0.94
<i>Lecythis davissi</i>	Tinajito	1.11	2817.92	282.72	1520	1252.8	3.69
<i>Tabebuia serratifolia</i>	Tahuari	1.1	2622.56	262.88	1586.6	275.2	3

Fuente: Adaptado de Klinger y Talero (2001).

Especies potencialmente sustitutas por compresión paralela y sus principales propiedades, reportadas al 0% de contenido de humedad.

Nombre científico	Nombre común	Densidad anhidra (gr/cm ³)	RUM Flexión (kg/cm ²)	MOE Flexión (1000 kg/cm ²)	RUM Compresión paralela (kg/cm ²)	RUM Cizallamiento (kg/cm ²)	RUM Impacto (kg-m/cm ²)
<i>Chaetocarpus schomburgkianus</i>	Cacho	0.94	2255.48	270.32	1444.8	0	0
<i>Heterostemon vageleri</i>	Guamo rosado	0.92	2846.6	0	1432	211.2	1.57
<i>Pouteria</i> sp.	Caimo	0.86	2545.6	0	1440	0	1.18

Fuente: Adaptado de Klinger y Talero (2001).

Especies potencialmente sustitutas por cizallamiento y sus principales propiedades, reportadas al 0% de contenido de humedad.

Nombre científico	Nombre común	Densidad anhidra (gr/cm ³)	RUM Flexión (kg/cm ²)	MOE Flexión (1000 kg/cm ²)	RUM Compresión paralela (kg/cm ²)	RUM Cizallamiento (kg/cm ²)	RUM Impacto (kg-m/cm ²)
<i>Roseadendron chryseum</i>	Roble amarillo	0.63	1639.84	119.04	984	158.4	1.13
<i>Aniba amazonica</i>	Mocha amarilla	0.62	11168.33	173.64	697.09	160.02	0
<i>Podocarpus oleifolius</i>	Pino chaaquiro	0.58	973.93	132.62	558.42	159.02	0
<i>Calophyllum brasiliensis</i>	Punte guayabo	0.63	1351.24	161.2	926.4	158.4	3.44
<i>Cariniana estrellensis</i>	Yesquero	0.64	1252.08	132.68	822.4	158.4	3.34
<i>Jacaranda</i> sp.	Chingalé	0.63	1401.56	0	800	160	1.15
<i>Dendrobangia</i> sp.	Chontadurillo	0.70	1765.64	205.84	988.8	172.8	175
<i>Ecclinusa guianensis</i>	Chicle	0.95	1864.8	192.2	1025.6	172.8	1.57

Fuente: Adaptado de Klinger & Talero (2001).

Especies potencialmente sustitutas por impacto y sus principales propiedades, reportadas al 0% de contenido de humedad.

Nombre científico	Nobre común	Densidad anhidra (gr/cm ³)	RUM Flexión (kg/cm ²)	MOE Flexión (1000 kg/cm ²)	RUM Compresión paralela (Kg/cm ²)	RUM Cizallamiento kg/cm ²)	RUM Impacto (kg-m/cm ²)
<i>Clathrotropis brachipetala</i>	Sapán	0.96	2412.4	0	1856	0	1.35
<i>Helicostylis tomentosa</i>	Lecheperra	0.91	2886.0	0	1584	0	1.25
<i>Lagerstroemia</i> sp. *	Punte cascarillo	0.96	2782.4	235.6	1491.2	225.6	1.17
<i>Lecythis</i> sp.		0.9	2902.28	0	1302.4	0	1.19
<i>Callophyllum</i> sp.	Punte, Guayabo	0.87	2406.48	0	1361.6	0	0.96
<i>Humiria balsamifera</i>	Oloroso	0.87	2656.6	256.68	1292.8	235.2	1.06
<i>Humiriastrum procera</i>	Chanul	0.79	2521.92	269.08	1411.2	196.8	0.94

Fuente: Adaptado de Klinger & Talero (2001).