

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Forestal**

**PROPIEDADES DE LA MADERA DE *CEDRELA ODORATA* DE
NUEVE Y DIEZ AÑOS EN UN SAF CON *THEOBROMA*
CACAO, COMPARADO CON UNA PLANTACIÓN PURA DE
DIEZ AÑOS. TURRIALBA, COSTA RICA.**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

BEATRIZ SEGURA ELIZONDO

**CARTAGO, COSTA RICA
2019**


Acreditación

Acreditación

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por Ph.D. Roger Moya Roque, Dr. Freddy Muñoz Acosta y M.Sc. Johanna Gaitán Álvarez como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



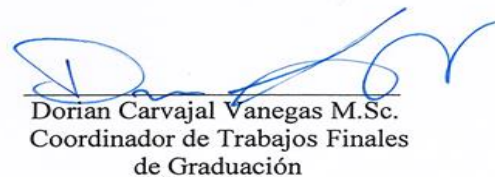
Roger Moya Roque Ph. D
Director de Tesis



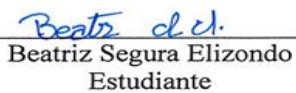
Freddy Muñoz Acosta Dr.
Profesor lector



Johanna Gaitán Álvarez M.Sc.
Lectora



Dorian Carvajal Vanegas M.Sc.
Coordinador de Trabajos Finales
de Graduación



Beatriz Segura Elizondo
Estudiante

Propiedades de la madera de *Cedrela odorata* L de nueve y diez años en un SAF con *Theobroma cacao* comparado con una plantación pura de diez años. Turrialba, Costa Rica

Wood properties of *Cedrela odorata* L of nine and ten years in an AF with *Theobroma cacao* compared with a pure plantation of ten years. Turrialba, Costa Rica

Beatriz Segura-Elizondo *

Resumen

Cedrela odorata Linneo ha tenido gran importancia en sistemas agroforestales (SAF) por el bienestar aportado al cultivo, además de su excelente desarrollo y sus usos maderables. No obstante, el conocimiento en calidad de madera de los árboles en estos sistemas es poco conocido. Por lo que se planteó el objetivo de conocer las propiedades morfológicas (DAP, corteza, albura, duramen, médula), físicas (peso específico, densidad, contenido de humedad y contracciones), mecánicas (dureza, cizalle, flexión, compresión y tensión), químicas (celulosa, lignina, compuestos solubles en solventes orgánicos e inorgánicos y porcentajes de C,H,N,S) y energéticas (volátiles, cenizas y poder calórico), de la madera de árboles de cedro de nueve y diez años creciendo en dos SAF. Estas propiedades fueron comparadas con una plantación pura de cedro de diez años. Los resultados mostraron que las propiedades morfológicas de los árboles en SAF y plantación pura fueron iguales estadísticamente en todos los parámetros, excepto en espesor de corteza y albura. En las propiedades físicas densidad básica, contenido de humedad y contracciones no se presentó diferencias entre las plantaciones analizadas. Las propiedades mecánicas de la madera de los SAF se diferencian en dureza axial y flexión con la plantación pura. En las propiedades químicas la plantación de nueve años presenta diferencias estadísticas con las de diez años en solubilidad en agua fría y en etanol-tolueno. En propiedades de energía los SAF presentaron diferencias con la pura en poder calórico.

Palabras clave: Cedro, sistemas agroforestales, propiedades de la madera.

Abstract

Cedrela odorata Linneo has been important in agroforestry systems (AF) for the welfare contributed to the crop, in addition to its excellent development and its timber uses.. However, the knowledge in wood quality of the trees in these systems is little known. The objective of the present study is to know the morphological properties (DAP, bark, sapwood, heartwood, pith), physical (specific gravity, density, moisture content and shrinkages), mechanical (hardness, shear, bending, compression and tension), chemical (cellulose, lignin, compounds soluble in organic and inorganic solvents and percentages of C, H, N, S) and energy (volatile, ash and caloric power), of the wood of trees growing in two AF of cedar of nine and ten years with cocoa. These properties were compared with a pure ten-year-old cedar plantation. The results showed that the morphological properties of the trees in SAF and pure plantation were statistics equal in all the parameters, except in thickness of bark and sapwood. In the physical properties, basic density, moisture content and contractions were equal among the plantations analyzed. In mechanical properties the wood of SAF differ in axial hardness and flexion with pure planting. In the chemical properties, the nine-year plantation shows statistics differences with those of ten years in solubility in cold water and in ethanol-toluene. In energy properties, the SAF presented statistics differences with the pure in caloric power.

Keywords: Cedar, agroforestry systems, properties of wood.

Segura-Elizondo, B. 2019. Propiedades de la madera de *Cedrela odorata* L de nueve y diez años en un SAF con *Theobroma cacao* comparado con una plantación pura de diez años. Turrialba, Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica; Escuela de Ingeniería Forestal; Cartago, Costa Rica.

Dedicatoria

A mis papás Virginia Elizondo Segura y Hernán Segura Segura por su apoyo y amor incondicional

Agradecimientos

A Dios y a la Virgencita que me acompañaron durante toda la carrera y nunca me dejaron caer.

A mis padres por su amor, apoyo y oraciones constantes.

A mi esposo por su amor, por apoyarme y ayudarme a salir adelante.

A mis hermanos, mis amigos.

A mi tutor de trabajo de graduación, a Hacienda Azul S.A., quienes aportaron los materiales para esta investigación y a todos los que me apoyaron y ayudaron a salir adelante.

Índice general

Contenido

Acreditación.....	ii
Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimientos	v
Índice general.....	vi
Índice de figuras.....	vii
Índice de cuadros	vii
Introducción.....	9
Materiales y métodos	11
Área de estudio y plantaciones	11
Diseño experimental y muestreo.....	12
Propiedades morfológicas.....	13
Propiedades físicas.....	14
Propiedades mecánicas	16
Propiedades químicas y de energía.....	16
<i>Análisis estadístico</i>	17
Resultados.....	17
Propiedades morfológicas.....	17
Propiedades físicas.....	21
Propiedades mecánicas	23
Propiedades químicas	24
Propiedades energéticas.....	25
Discusión	26
Propiedades morfológicas.....	26
Propiedades físicas.....	27
Propiedades mecánicas	28

Propiedades químicas	29
Propiedades de energía	30
Madera de SAF vrs Plantación pura	30
Conclusiones.....	30
Referencias.....	32

Índice de figuras

Figura 1. Disposición de la obtención de las muestras de los árboles. Patrones de muestreo de árboles para trozas (A.1) y discos transversales (A.2), mediciones a las secciones transversales (B), muestreo en la determinación de las propiedades físicas, químicas y energéticas de la madera (C) y muestra para determinar las propiedades mecánicas (D) 133

Figura 2. Comportamiento en la variación correspondientes a el diámetro del duramen, al espesor de albura, al espesor de corteza y al diámetro de la médula en diferentes porcentajes de altura, en edades de nueve y diez años en un SAF comparado con una plantación pura de diez años..... 19

Figura 3. Comportamiento del peso específico y la densidad en diferentes porcentajes de altura, en edades de nueve y diez años en un SAF comparado con una plantación pura de diez años. 233

Figura 4. Porcentaje de material volátil (a), de cenizas (b) y poder calórico (b) en madera de Cedrela odorata de árboles de nueve y diez años en SAF comparado con una plantación pura de diez años. 26

Índice de cuadros

Cuadro 1. Parámetros dasométricos de Cedrela odorata creciendo en un sistema agroforestal con T. cacao..... 122

Cuadro 2. Espesor de corteza y de albura, diámetro de duramen y de médula, determinadas a la altura del DAP para C. odorata de 9 y 10 años en SAF y en una plantación PURA de 10 años 188

Cuadro 3. Porcentajes correspondientes al espesor de corteza, el diámetro del duramen, al espesor de albura y al diámetro de la médula en diferentes porcentajes de altura, en edades de nueve y diez años en un SAF comparado con una plantación pura de diez años..... 221

Cuadro 4. Peso específico, densidad, contracción volumétrica y contenido de humedad determinadas a la altura del DAP para edades de nueve y diez años de cedro en SAF comparado con una plantación pura de diez años.	222
Cuadro 5. Flexión, compresión, dureza, cizalle y tensión en edades de nueve y diez años en SAF comparado con una plantación pura de diez años.....	244
Cuadro 6. Porcentajes determinados a la altura del DAP para celulosa, lignina, nitrógeno, carbono, azufre e hidrógeno y porcentajes de compuestos solubles en agua caliente, agua fría, etanol con tolueno y diclorometano para C. odorata de 9 y 10 años en SAF y una pura de 10 años	25

Introducción

Cedrela odorata Linneo (cedro amargo), perteneciente a la familia Meliaceae, es una de las especies de mayor importancia económica en América [1]. Esta especie se presenta en los bosques naturales de zonas de vida bosque húmedo tropical, bosque húmedo subtropical y bosque seco tropical [2]. Se distribuye desde el norte de México hasta el norte de Argentina, incluidas las islas del Caribe. Se le encuentra desde el nivel del mar hasta 1000msnm, con temperaturas entre 20 y 32°C y con una precipitación entre 1200 y 2000mm por año, con una estación seca de tres a cuatro meses en [3].

La madera de *C. odorata* es de excelente calidad y es considerada la segunda especie más valiosa del mundo por su valor económico, luego de *Switenia macrophylla*. La madera es utilizada para construcción ligera, decoración de interiores, construcción de barcos (cubiertas y forros), para confeccionar muebles finos, instrumentos musicales, baúles, cajas de puros, estuches, lambrín, parquet, carpintería y ebanistería en general en [4].

Además de presentarse en los bosques naturales, *C. odorata* se ha establecido en plantaciones forestales puras para la producción de madera [5]. También, presenta un buen comportamiento en asociación con otros cultivos por lo que se ha convertido en una especie económicamente rentable en sistemas agroforestales [6], [7], por lo que es considerada de gran potencial en este tipo de sistemas agroforestales (SAF) con cultivos de especies de ciclo corto como maíz, arroz, caña, papachina, plátano, banano y recientemente con *Theobroma cacao* (cacao) en [8], [9].

Los sistemas agroforestales son una alternativa para el manejo de zonas de bosque tropical, de laderas intervenidas o en degradación. Sus beneficios se basan en el uso eficiente de los recursos, la productividad y la seguridad alimentaria de las comunidades rurales [10]. Los sistemas agroforestales implican una serie de tecnologías que permiten el máximo uso de las tierras agrícolas con diversidad de flora y fauna, en cultivos que adaptados a la sombra responden muy bien productivamente [11]. Las especies de árboles más utilizadas en sistemas agroforestales son aquellas que presentan características maderables que posean buena dimensión y forma, o aquellas que proporcionen un ambiente de frescor a la plantación y *Cedrela odorata* (cedro amargo), como otras especies tienen este potencial [7]. Los resultados en relación a las propiedades de la madera pueden mejorar por la asociación entre árboles y cultivos, además

dependen en gran medida de las especies que se utilicen, del manejo que se le dé a los árboles, de la forma del asocio y de las condiciones del clima en cada sitio [12], [7]. El envejecimiento del árbol, la fertilización aportada por el abono, las enmiendas realizadas a los cultivos, así como la aplicación de podas y en general el manejo al que está sometido el producto agrícola, podrían brindarle a la madera cualidades diferentes a la madera extraída de árboles creciendo en bosque natural o en plantaciones forestales [7], [13], [14].

En Costa Rica, la producción de madera es una actividad económicamente atractiva bajo el método de sistemas agroforestales, por el hecho de ser complementaria a otras medidas de optimización y diversificación de productos en las fincas en [9]. Varios estudios han mostrado la importancia económica y crecimiento que tiene *Cedrela odorata*, plantado en SAF [15], [16], [17]. Los principales estudios realizados en los SAF con *C. odorata* se concentran en aspectos silviculturales. Por ejemplo [18] menciona que árboles de *C. odorata* son afectados en los primeros dos años por *Hypsipyla grandella*, por lo cual debe procurarse mantener limpio el sitio de la plantación y se deben hacer podas. En [19] menciona que hay una relación estrecha entre la calidad morfológica y fisiológica de la planta con la dosis de fertilizante.

En años recientes ha habido un especial interés de conocer la calidad de la madera de *Cedrela odorata* de árboles provenientes de los bosques naturales, de plantaciones forestales puras y más recientemente la madera proveniente de SAF [5], [20], [14]. En el caso de la madera proveniente de SAF, [20] mencionan que la calidad de la madera, en sistemas agroforestales presenta buenas condiciones de desarrollo y de calidad de madera para su uso estructural o en mueblería.

Otros estudios, muestran que la madera de árboles de *C. odorata* proveniente de un SAF comparada con la madera de árboles de una plantación pura no presentan diferencias en la densidad de la madera, ni en el de contenido de humedad, ni en el MOE longitudinal y recalco que la influencia a las propiedades está dada por factores ambientales en [21]. Por su parte en [20] estudiaron la madera de árboles de dos SAF y encontraron que algunas propiedades mostraron diferencias en las dos poblaciones en porcentajes de corteza, médula, contracción volumétrica, contenido de humedad, densidad verde, MOR y MOE en flexión, así como en la resistencia en compresión longitudinal y tensión. En un estudio llevado en [14] en árboles de

cuatro SAF con diferentes edades, encontraron que las propiedades morfológicas y físicas de la madera analizada presentaron pocas diferencias entre las alturas y las edades evaluadas.

A pesar de estos importantes estudios, una limitada cantidad de estos compara la madera proveniente de los SAF con plantaciones puras para *C. odorata*, específicamente en las propiedades físicas, químicas, morfológicas y mecánicas. Por lo que es necesario desarrollar más investigaciones que permitan determinar las condiciones que adquiere la madera bajo esta modalidad de cultivo en SAF en comparación con una plantación tradicional. Es por esta razón que el siguiente trabajo tiene como objetivo determinar las diferencias en propiedades morfológicas, físicas, mecánicas, químicas y de energía de la madera de cedro de nueve y diez años de dos sistemas agroforestales y comparar estas con una plantación pura de diez años de edad.

Materiales y métodos

Área de estudio y plantaciones

El área de las plantaciones se ubica en la Finca Hacienda Azul (9°58'02"N – 83°36'44"W), en Peralta donde se encuentran los sistemas agroforestales (SAF) y en el Sauce donde está la plantación pura (PURA); ambos sitios del cantón de Turrialba-Cartago, Costa Rica. El sitio a evaluar se compone de tres plantaciones, de las cuales dos son SAF de *Theobroma cacao* (cacao) con *Cedrela odorata* y una plantación pura de esta última especie. Los SAF fueron establecidos en los años 2010 y 2009, por lo cual en el momento de la evaluación de las propiedades de la madera, los árboles tenían nueve (9-SAF) y diez años (10-SAF) respectivamente y los cuales fueron plantados a 3 x 3 m. La plantación pura (10-PURA) fue plantada de igual manera a 3x3m en el 2009, contaba con una edad de diez años al momento realizar el análisis de sus propiedades. El sitio donde se encuentran las plantaciones presentan niveles de precipitación promedio de 3759mm anuales, no se presenta una estación seca bien definida y en los meses de marzo y abril se presenta la menor cantidad de precipitación, se sitúan en la zona de vida bosque muy húmedo, con temperaturas que van desde los 17 a los 24 grados centígrados, altitud 1020msnm y humedad relativa del 88%. Con respecto al manejo de las tres plantaciones durante el primer año, se aplicaron insecticidas cada 22 días para evitar el ataque de *Hypsipyla grandella*, además de realizar aplicaciones de abonos tres veces al año. Las podas y raleos se empezaron a realizar a partir de los dos años y las chapeas las realizan 2 o 3 veces al año dependiendo el desarrollo de la maleza en los SAF. Inicialmente la 10-PURA fue una plantación mixta de cedro y un tipo

de helecho, este último no tuvo el desarrollo deseado, por lo cual se dejó crecer la plantación sin cuidados adicionales por lo que en el momento del ensayo la plantación no contaba con manejo.

Diseño experimental y muestreo

Para la selección de los árboles a cortar se crearon parcelas, las cuales fueron medidas, en donde el diámetro promedio de cada parcela fue la base para seleccionar los árboles a cortar. Las características dasométricas de las parcelas establecidas se detallan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros dasométricos de *Cedrela odorata* creciendo en un sistema agroforestal con T. cacao

Edad	Densidad (árboles/ha)	Altura total (m)	Dap (cm)	Tasa de crecimiento promedio
9-SAF	1000	26,2	22,8	2,5
10-SAF	720	28,0	23,9	2,4
10-PURA	960	26,5	17,8	1,8

De cada una de las plantaciones de *Cedrela odorata* se seleccionó aleatoriamente un total de nueve árboles. Los árboles a muestrear tenían un diámetro aproximado al diámetro promedio de la plantación (Cuadro 1), el cual se obtuvo mediante la toma previa de diámetros de las parcelas establecidas, siguiendo los pasos de la metodología desarrollada en [22]. Los árboles cortados tenían troncos rectos, ramificación normal y sin síntomas de enfermedades o plagas.

El muestreo de los árboles consistió en la corta de discos transversales y de trozas. En el caso de las trozas se obtuvieron dos secciones del árbol (Figura 1.A.1): una desde la base hasta el DAP y la otra del DAP al 25% de la altura comercial. En el caso de los discos transversales fueron de 3,0cm de espesor y fueron cortados en la base, en el DAP (diámetro a la altura del pecho, correspondiente a 1,3m de altura, medido desde la base del árbol), al 25%, 50%, 75% y 100% de la altura comercial (Figura1.A.2).

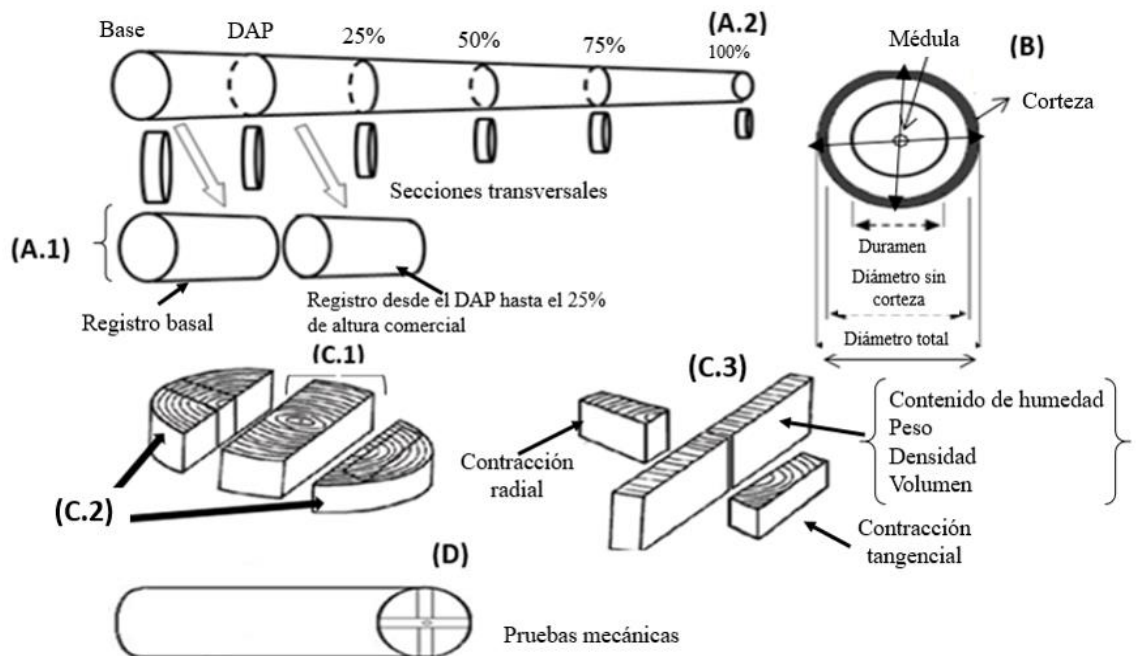


Figura1. Disposición de la obtención de las muestras de los árboles. Patrones de muestreo de árboles para trozas (A.1) y discos transversales (A.2), mediciones a las secciones transversales (B), muestreo en la determinación de las propiedades físicas, químicas y energéticas de la madera (C) y muestra para determinar las propiedades mecánicas (D)..

Propiedades morfológicas

En cada disco transversal se determinó el diámetro del árbol, corteza (espesor y porcentaje del área total), albura (espesor y porcentaje del área total), duramen (diámetro y porcentaje del área total) y médula (diámetro y porcentaje del área total). En cada uno de los discos se trazaron dos líneas perpendiculares ambas pasando por el centro de la médula una línea en sentido norte-sur y la otra en sentido este-oeste (Figura 1. B). Se midió el diámetro total, diámetro sin corteza, diámetro del duramen y diámetro de la médula en los dos sentidos que fueron marcados en el disco. Luego se calculó el promedio de las dos medidas transversales realizadas para obtener el diámetro total, diámetro del duramen, diámetro de la médula. En caso de espesor de corteza y espesor de la albura, fueron calculados por medio de la diferencia entre diámetro total y diámetro sin corteza y diámetro del duramen, respectivamente, los cuales se calcularon asumiendo un círculo geométrico. En el caso del porcentaje (de corteza, de albura, de duramen, y de la médula) fueron calculados en relación con el área de estos tejidos y el área total del disco.

Propiedades físicas

Se determinó densidad (básica (Ecuación 1), al 12% (Ecuación 2) y al 0% (Ecuación 3) de contenido de humedad), peso específico (básico (Ecuación 4), al 12% (Ecuación 5) y al 0% (Ecuación 6) de contenido de humedad), contenido de humedad verde (Ecuación 7) y al 12% (Ecuación 8), contracción volumétrica total (Ecuación 9) y al 12% (Ecuación 10) de contenido de humedad. Estas propiedades fueron determinadas para cada porcentaje de altura comercial (0%, DAP, 25%, 50%, 75%, 100%) en cada disco del fuste. En cada sección transversal se midió a 1,5cm del centro de la médula a cada lado, es decir se cortó una pieza de 3,0cm de ancho incluida la médula (Figura 1.C.1), además de obtener dos secciones para las pruebas de contracciones de corte tangencial y radial (Figura 1.C.2). Esta parte central fue dividida en la médula por lo que se obtuvieron dos muestras (Figura 1.C.3) y se obtuvo dos muestras una de corte tangencial y la otra de corte radial (Figura 1.C.3). Seguidamente se determinó el peso verde (peso sin secar la pieza de madera) y el volumen. Luego esta muestra se dejó secar al aire en una cámara de control ambiental con condiciones controladas (temperatura de 22°C y 66% de humedad relativa) hasta que alcanzará un peso constante de 12% (condición seca al aire). Una vez en esa condición fue determinado el peso y el volumen nuevamente. Seguidamente las muestras se colocaron en un horno a 103°C por 24 horas (condición de 0% de contenido de humedad) y nuevamente se determinó el peso y el volumen. El volumen verde, al 12% y al 0% de contenido de humedad de cada muestra respectivamente se definió como el volumen de agua desplazado cuando se sumergió la pieza en un recipiente con agua, de acuerdo con los estándares ASTM D2395-14 (ASTM 2014a). El detalle para calcular los diferentes parámetros es detallado en las siguientes ecuaciones:

$$Densidad\ básica = \left(\frac{Peso\ verde}{Volumen\ verde} \right) \quad (1)$$

$$Densidad\ al\ 12\% = \left(\frac{Peso\ al\ 12\%}{Volumen\ al\ 12\%} \right) \quad (2)$$

$$Densidad\ al\ 0\% = \left(\frac{Peso\ al\ 0\%}{Volumen\ al\ 0\%} \right) \quad (3)$$

$$Peso\ específico\ básico = \left(\frac{Peso\ al\ 0\%}{Volumen\ verde} \right) \quad (4)$$

$$\text{Peso al 12\%} = \left(\frac{\text{Peso al 0\%}}{\text{Volumen al 0\%}} \right) \quad (5)$$

$$\text{Peso al 0\%} = \left(\frac{\text{Peso al 0\%}}{\text{Volumen al 0\%}} \right) \quad (6)$$

$$\text{Contenido de humedad verde} = \left(\frac{\text{Peso verde} - \text{Peso al 0\%}}{\text{Peso al 0\%}} \right) \times 100 \quad (7)$$

$$\text{Contenido de humedad al 12\%} = \left(\frac{\text{Peso al 12\%} - \text{Peso al 0\%}}{\text{Peso al 0\%}} \right) \times 100 \quad (8)$$

$$\text{Contracción total} = \left(\frac{\text{Volumen verde} - \text{Volumen al 0\%}}{\text{Volumen verde}} \right) \times 100 \quad (9)$$

$$\text{Contracción verde} = \left(\frac{\text{Volumen verde} - \text{Volumen al 12\%}}{\text{Volumen verde}} \right) \times 100 \quad (10)$$

Para determinar las contracciones radiales y tangenciales se cortaron dos piezas una en sentido tangencial y la otra en sentido radial con dimensiones de 2,5 x 2,5 x 10cm (Figura 1.C.3). Posteriormente con un micrómetro se determinó su longitud verde (sin secar la muestra). Luego la muestra se dejó secar al aire en una cámara de control ambiental con condiciones controladas (temperatura de 22°C y 66% de humedad relativa) hasta que alcanzó un peso constante que corresponde al 12% (condición seca al aire). En esta condición nuevamente se midieron las piezas. Por último las piezas se colocaron en el horno durante 24 horas a 103°C para obtener un contenido de humedad del 0% y se midieron nuevamente para determinar la cantidad de contracción, este valor fue obtenido por medio de la ecuación 11 y 12.

$$\text{Contracción al 12\%} = \left(\frac{\text{Longitud verde} - \text{Longitud al 12\%}}{\text{Longitud verde}} \right) \times 100 \quad (11)$$

$$\text{Contracción al 0\%} = \left(\frac{\text{Longitud verde} - \text{Longitud al 0\%}}{\text{Longitud verde}} \right) \times 100 \quad (12)$$

Propiedades mecánicas

De las trozas obtenidas de los árboles muestreados fueron aserradas acorde con la figura 1.D. Tomando piezas, adecuadamente orientadas en los cortes tangencial y radial, de 6 x 6cm y éstas fueron secadas a una condición de 12%. Luego se cortaron las piezas para realizar los diferentes ensayos que en su mayoría son de 5 x 5cm de sección transversal. En flexión estática (módulo de ruptura y módulo de elasticidad) fueron cortadas piezas de 5 x 5 x 80cm, para la dureza lateral Janka piezas de 5 x 5 x 15cm, para compresión paralela al grano (esfuerzo máximo de aplastamiento) piezas de 5 x 5 x 20cm y para cizalladura paralela al grano (esfuerzo máximo de corte) piezas de 5 x 5cm. Como se indicó los ensayos fueron realizados a un contenido de humedad del 12% y siguiendo los estándares ASTM D143-14 (ASTM 2014b). En el caso de los ensayos de flexión y dureza lateral Janka, fue utilizada la máquina universal de ensayos Tinius Olsen H10KT y para las pruebas de compresión paralela al grano y cizalladura paralela se utilizó la máquina de ensayos Tinius Olsen L 60 toneladas. Para cada uno de los ensayos mecánicos determinados se preparó un total de 18 muestras por edad por cada prueba.

Propiedades químicas y de energía

De cada plantación sólo de la sección del DAP de los árboles muestreados, se molió aproximadamente 72g por plantación hasta un tamaño de partícula de menos de 0,6mm y luego se tamizó a través de una malla número 40 y otra 60 (425µm y 250µm, respectivamente) para el análisis químico y energético de la madera. Las propiedades químicas determinadas fueron: celulosa, lignina, el contenido de extractos en agua caliente, agua fría, etanol con tolueno, diclorometano, hidróxido de sodio (NaOH) y contenido de C, H, N, S. Las propiedades energéticas determinadas fueron los macros y micros elementos contenidos en las cenizas, volátiles y el poder calórico.

Se utilizaron tres muestras de cada plantación para estas propiedades. En la determinación de contenido de la lignina se utilizó el método T222 om-02 (TAPPI 2002) y para celulosa se utilizó el método ASTM D1102-84 (2013). El contenido de extractos se determinó en agua (condición caliente y fría) acorde con la norma ASTM D1110-84 (2013b), en hidróxido de sodio (NaOH) con la norma ASTM D 1109-84 (2013c), en una solución de etanol-tolueno con la norma ASTM D1107-96 (2013d) y en diclorometano (CH₂-Cl₂) con la norma ASTM D1108-96 (2013e). Para el análisis de la determinación de la masa de nitrógeno, carbono, hidrógeno y azufre, se utilizó

un analizador CHNS vario El cube serie 19171074. Para contenido de cenizas y volátiles se utilizó la mufla Thermolyne, la determinación se realizó a través del estándar D1102-84 (ASTM 2013a) y la norma ASTM D1762-84 (2007), respectivamente. Para el análisis de poder calórico se utilizó la bomba calorimétrica modelo 6772, se utilizaron 5 muestras para cada plantación, cada una con un tamaño de partícula de aproximadamente 0,06 gramos, con un contenido de humedad de 0%, siguiendo la norma ASTM D-5865 (ASTM 2003a). En todos los casos los componentes de la madera fueron reportados en porcentajes.

Análisis estadístico

Se aplicó una descripción estadística general (promedio y coeficiente de variación) para todas las propiedades de la madera. Luego se realizó un análisis de varianza ANOVA para comprobar el efecto de las diferentes condiciones de crecimiento de los árboles (SAF y PURA). Este análisis fue aplicado solamente para las propiedades al DAP y para determinar las diferencias significativas entre las propiedades morfológicas, físicas, mecánicas, químicas y energéticas en las plantaciones fue aplicado un análisis de media por la prueba de rango múltiple de Tukey ($P < 0.05$). En caso de la variación de las propiedades que fueron determinadas por altura (diámetro total, espesor de corteza, espesor de albura, diámetro de médula y diámetro del duramen) solamente fue presentada su variación con la altura y se observó su comportamiento.

Los programas estadísticos utilizados fueron SAS e Info Stat, el cual es un software libre para análisis estadístico de aplicación general desarrollado bajo la plataforma Windows.

Resultados

Propiedades morfológicas

En relación a las propiedades morfológicas a la altura de DAP, en general se presentaron diferencias estadísticas en todos los parámetros analizados, con la excepción del espesor de corteza y de albura, que no hay diferencias estadísticas entre 10-PURA, 9-SAF y 10-SAF (Cuadro 2). En el diámetro total, la condición 9-SAF y 10 SAF, no presentaron diferencias estadísticas, pero si con la 10-PURA. En el porcentaje de corteza, los árboles de *C. odorata* creciendo en la plantación pura (10-PURA) presentan el porcentaje estadísticamente más alto, seguido de 9-SAF y por último, con el valor estadísticamente más bajo la condición de 10-SAF

(Cuadro 2). En el porcentaje de albura, los árboles en sistemas agroforestales (9-SAF y 10-SAF) no presentaron diferencias estadísticas entre ellos, pero cuando se compara con los árboles de la plantación pura, la condición de 10-SAF es estadísticamente diferente a 10-PURA (Cuadro 2). En el diámetro y porcentaje de duramen los árboles del 10-SAF presentan mayores valores que los árboles de la condición de 9-SAF, pero la condición de 10-SAF no es estadísticamente diferente de la condición de plantación pura (Cuadro 2). En el diámetro y porcentaje de médula los árboles de las dos condiciones de SAF (9-SAF y 10-SAF), no presentaron diferencias estadísticas, pero los árboles de la plantación pura presentaron un diámetro de médula igual a la condición de 10-SAF y estadísticamente diferente a la condición de 9-SAF. En tanto que en el porcentaje de médula los árboles creciendo en SAF presentaron menor porcentaje de médula que los árboles en 10-PURA.

Cuadro 2. Espesor de corteza y de albura, diámetro de duramen y de médula, determinadas a la altura del DAP para *C. odorata* de 9 y 10 años en SAF y en una plantación PURA de 10 años

Parte del árbol	Parámetro	9- SAF	10-SAF	10-PURA
Diámetro total		17,06 ^A (28,38)	17,59 ^A (30,89)	15,87 ^B (24,69)
Corteza	Espesor (cm)	0,59 ^A (18,67)	0,56 ^A (22,22)	0,61 ^A (21,88)
	Porcentaje	13,85 ^A (19,89)	12,95 ^B (23,87)	15,00 ^C (12,14)
Albura	Espesor (cm)	4,60 ^A (28,91)	4,44 ^A (27,64)	4,55 ^A (22,00)
	Porcentaje	70,75 ^{AB} (7,44)	68,57 ^A (13,41)	72,96 ^B (5,74)
Duramen	Diámetro (cm)	6,69 ^A (36,88)	7,59 ^B (48,25)	5,56 ^C (37,45)
	Porcentaje	14,90 ^A (31,90)	17,97 ^B (49,41)	11,47 ^A (37,97)
Médula	Diámetro (cm)	1,10 ^A (31,79)	1,06 ^B (28,97)	1,07 ^B (23,85)
	Porcentaje	0,51 ^A (59,03)	0,51 ^A (73,77)	0,58 ^B (61,55)

Leyenda: letras diferentes indican diferencias significativas en el nivel de confianza del 95% para el mismo factor. Los valores entre paréntesis representan coeficiente de variación.

En relación con la variación en la altura del árbol se tiene que el espesor de duramen, el espesor de albura y la corteza disminuyen de la base hasta la altura comercial (Figura 2a-c). Pero en el caso del diámetro de la médula hay un comportamiento diferente, el menor diámetro de médula se presenta en la base del árbol, luego esta empieza a aumentar a la altura del 25% de la altura comercial, para luego empezar a disminuir hasta la altura comercial de 100% (Figura 2d). En relación con las diferencias en los dos sistemas de crecimiento utilizados (SAF y PURA), en el

diámetro del duramen, los árboles del SAF presentan mayor diámetro de duramen a cualquier altura que los árboles de la plantación pura (Figura 2a). Los árboles de 10-SAF presentan mayor diámetro de duramen que los árboles de 9-SAF hasta una altura de 75% y en tanto que los árboles de 10-PURA presentan menor diámetro en las diferentes alturas del árbol. En relación con el espesor de la albura (Figura 2b), se puede observar que las tres edades tienen un espesor muy semejante en las diferentes alturas, siendo la condición de 9-SAF ligeramente diferente a la altura de 0 y al 100% de altura comercial. Respecto al espesor de corteza (Figura 2c) se observa que en los árboles de la condición de 10-SAF, el espesor es ligeramente diferente a la condición de 9-SAF y 10-PURA hasta la altura del 75% y entre la condición de 10-SAF y 10-PURA no se observan diferencias en las diferentes alturas. Otro aspecto que se observa es que los árboles de 10-PURA presenta menor diámetro de médula en todos los porcentajes de altura (Figura 2d), a excepción de la altura de 75%, donde el diámetro de la médula es menor en los árboles de 9-SAF.

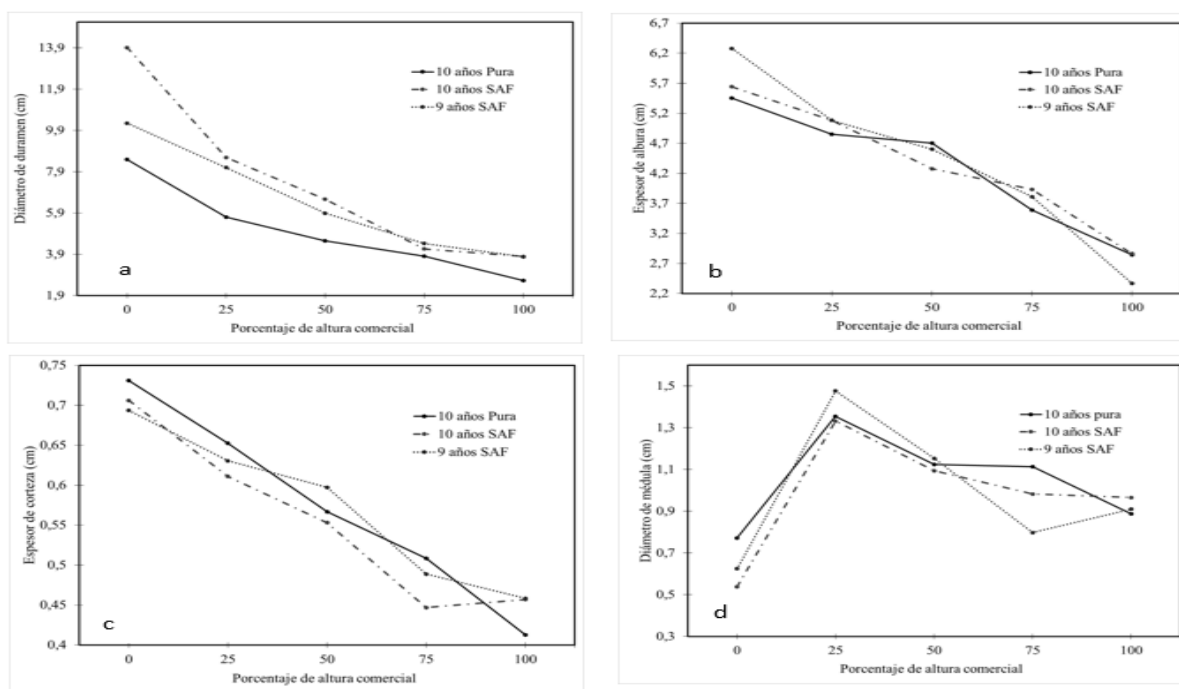


Figura 2. Variabilidad a diferentes porcentajes de altura para diámetro de duramen (a) y de médula (d), espesor de albura (b) y de corteza (c), para *C. odorata* de 9 y 10 años en SAF y una plantación PURA de 10 años

Respecto a la variación del porcentaje de duramen con la altura del árbol, se obtuvo que *C. odorata* en SAF presentó el mayor porcentaje en comparación a la condición PURA. La condición 10-SAF presenta mayor porcentaje que la condición de 9-SAF en los porcentajes de 0 y 50% de la altura, en el resto de las alturas son estadísticamente iguales. Al comparar con la condición de PURA se tiene que los árboles de la condición de SAF en todas las alturas presentan mayor porcentaje que 10-PURA. En relación con el porcentaje de albura, el comportamiento es inverso que el porcentaje de duramen, se presenta mayor porcentaje de albura en todas las alturas, exceptuando la altura de 25% que son estadísticamente iguales. La albura de los árboles creciendo en la condición de 9-SAF presentan un porcentaje de albura estadísticamente menor que los árboles creciendo en la plantación 10-PURA en las alturas de 25, 50 y 100%. En tanto que los árboles de la condición de 10-SAF presentan menor porcentaje de albura que los árboles de la condición de 10-PURA (Cuadro 3). Referente a porcentaje de corteza no se presentó diferencias entre los árboles de la condición de 10-SAF y los árboles creciendo en la condición 9-SAF, pero en comparación con la plantación 10-PURA, se presentaron diferencias solamente a la altura de 0 y 25%, donde los árboles de SAF presentan menor porcentaje de corteza (Cuadro 3). Finalmente, el porcentaje de la médula en los árboles de 9-SAF es estadísticamente diferente en los porcentajes de alturas de 25, 50 y 75%, el resto son estadísticamente iguales. Los árboles creciendo en la condición de SAF presentan menor porcentaje de médula que los árboles creciendo en 10-PURA, con la excepción de la altura de 100% (Cuadro 3).

Cuadro 3. Porcentajes correspondientes al espesor de corteza, el diámetro del duramen, al espesor de albura y al diámetro de la médula en diferentes porcentajes de altura, en edades de nueve y diez años en un SAF comparado con una plantación pura de diez años.

Parte del árbol	Parámetro	9- SAF	10-SAF	10-PURA
	Altura comercial (%)	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje
Duramen	0	17,91 ^A (22,70)	27,38 ^B (19,12)	16,50 ^C (14,68)
	25	17,02 ^A (7,18)	18,65 ^A (16,93)	11,41 ^B (9,80)
	50	12,76 ^A (9,55)	16,94 ^B (13,83)	8,93 ^B (15,00)
	75	11,61 ^A (12,55)	10,84 ^A (9,46)	9,19 ^C (18,98)
	100	15,42 ^A (14,32)	14,67 ^A (20,60)	7,49 ^B (11,47)
Albura	0	70,88 ^A (8,97)	62,33 ^B (7,40)	69,88 ^A (9,57)
	25	69,81 ^A (20,26)	69,03 ^A (21,95)	72,87 ^B (21,02)
	50	72,49 ^A (21,61)	69,44 ^B (24,49)	76,05 ^C (23,64)
	75	73,45 ^A (16,46)	75,09 ^B (32,34)	73,83 ^A (22,20)
	100	65,19 ^A (12,69)	67,33 ^B (32,36)	74,28 ^C (16,83)
Corteza	0	11,14 ^A (10,12)	10,25 ^A (10,25)	13,48 ^B (7,68)
	25	12,58 ^A (15,51)	11,83 ^A (17,25)	15,02 ^B (13,30)
	50	14,23 ^A (13,19)	13,13 ^A (20,67)	14,42 ^A (13,37)
	75	14,56 ^A (16,34)	13,45 ^A (20,91)	16,13 ^A (9,69)
	100	18,43 ^A (14,02)	17,04 ^A (35,47)	17,23 ^A (11,01)
Médula	0	0,07 ^A (6,88)	0,04 ^A (17,08)	0,14 ^B (9,58)
	25	0,60 ^A (9,31)	0,50 ^B (26,46)	0,69 ^A (14,62)
	50	0,52 ^A (26,21)	0,48 ^B (20,88)	0,60 ^A (24,08)
	75	0,38 ^A (23,50)	0,61 ^B (18,41)	0,86 ^C (16,10)
	100	0,97 ^A (17,80)	0,96 ^A (23,57)	1,00 ^A (11,23)

Leyenda: letras diferentes indican diferencias significativas en el nivel de confianza del 95% correspondiente a cada altura según el factor evaluado. Los valores entre paréntesis representan coeficiente de variación.

Propiedades físicas

Las propiedades físicas en general se presentan diferencias estadísticas en todos los parámetros analizados, con la excepción de densidad básica, contenido de humedad verde, contracción tangencial (total y al 12%) y contracción radial (total y al 12%), donde no hay diferencias estadísticas entre 10-PURA, 9-SAF y 10-SAF (Cuadro 4). En peso específico básico los árboles de la condición 9-SAF y 10 SAF, no presentaron diferencias estadísticas, pero sí con los árboles de la condición de 10-PURA. En peso específico y la densidad al 12 y al 0% de los árboles de

9-SAF y 10 SAF, no presentaron diferencias estadísticas, pero la condición 9-SAF si tubo diferencias significativas con 10-PURA (Cuadro 4). Para contracción volumétrica total y al 12% no se presentan diferencias en los árboles creciendo en los dos sistemas agroforestales (9-SAF y 10-SAF) y estos valores de contracción son estadísticamente más bajos que los valores de contracción de los árboles de la plantación pura (Cuadro 4).

Cuadro 4. Peso específico, densidad, contracción volumétrica y contenido de humedad determinadas a la altura del DAP para edades de nueve y diez años de cedro en SAF comparado con una plantación pura de diez años.

Factor	9- SAF	10-SAF	10-PURA
Peso específico básico	0,32 ^A (13,12)	0,31 ^A (13,42)	0,29 ^B (12,01)
Peso específico al 12%	0,33 ^A (12,67)	0,33 ^{AB} (13,05)	0,31 ^B (11,33)
Peso específico al 0%	0,35 ^A (13,36)	0,34 ^{AB} (13,32)	0,32 ^B (11,74)
Densidad básica (g/cm ³)	0,58 ^A (14,25)	0,57 ^A (13,58)	0,60 ^A (10,52)
Densidad al 12% (g/cm ³)	0,38 ^A (12,67)	0,37 ^{AB} (13,19)	0,35 ^B (11,35)
Densidad al 0% (g/cm ³)	0,35 ^A (13,36)	0,34 ^{AB} (13,32)	0,32 ^B (11,74)
Contenido de humedad verde (g)	82,23 ^A (17,59)	83,09 ^A (27,58)	108,15 ^A (14,17)
Contracción volumétrica al 12% (%)	4,08 ^A (37,64)	4,53 ^A (41,61)	6,03 ^B (37,65)
Contracción volumétrica total (%)	8,97 ^A (14,97)	8,95 ^A (18,92)	10,54 ^B (19,08)
Contracción tangencial al 12% (cm)	2,16 ^A (9,30)	2,21 ^A (24,37)	2,54 ^A (28,72)
Contracción tangencial al 0% (cm)	4,25 ^A (10,69)	4,62 ^A (11,81)	5,01 ^A (19,66)
Contracción radial al 12% (cm)	2,01 ^A (29,61)	1,52 ^A (41,55)	1,99 ^A (32,55)
Contracción radial al 0% (cm)	3,11 ^A (23,45)	2,80 ^A (16,21)	3,54 ^A (17,45)

Leyenda: letras diferentes indican diferencias significativas en el nivel de confianza del 95% para cada factor. Los valores entre paréntesis representan coeficiente de variación.

En relación con la variación en la altura del árbol de las propiedades físicas, se tiene que el peso específico básico en los árboles de las tres condiciones (9-SAF, 10-SAF y 10-PURA) disminuye de la base hasta el 25% de la altura comercial para luego aumentar hasta el 100% de la altura comercial (Figura 3a). También se observa que, en general excepto a la altura de 25%, se presenta un mayor peso específico en los árboles de la condición 9-SAF seguido de los árboles de la condición de 10-SAF, y por último, el peso específico básico es menor en los árboles de 10-PURA en relación con los árboles de SAF en cualquier altura comercial (Figura 3a). En el caso de la densidad básica hay un comportamiento un poco diferente, primero la densidad baja hasta el 25% para las tres condiciones, luego las dos condiciones SAF suben hasta el 100 %,

pero en la condición 10-PURA aumentó hasta el 50% y luego se mantiene hasta el 100% (Figura 3b).

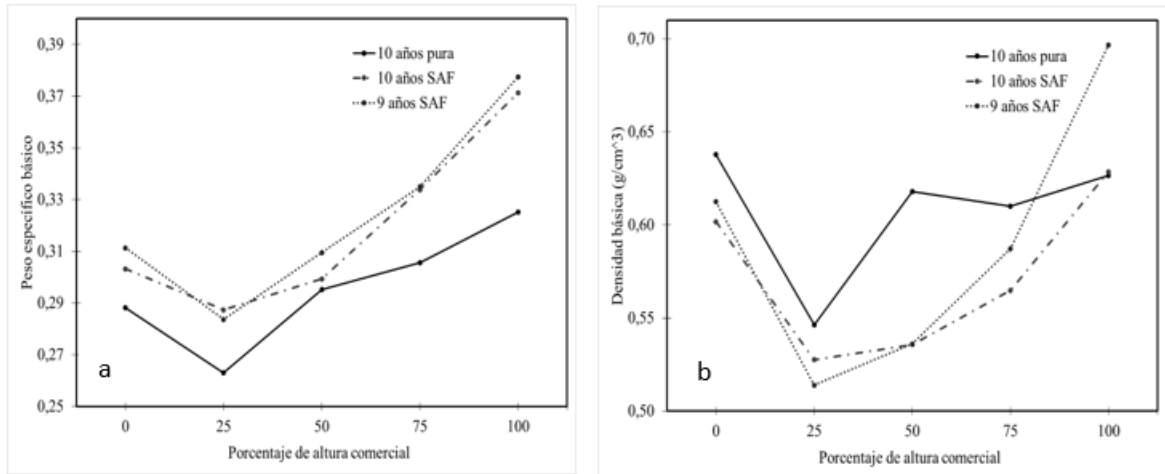


Figura 3. Comportamiento del peso específico y la densidad en diferentes porcentajes de altura, en edades de nueve y diez años en un SAF comparado con una plantación pura de diez años.

Propiedades mecánicas

En relación a las propiedades mecánicas no se presentan diferencias estadísticas en dureza lateral y axial, esfuerzo en cizalle tangencial y radial, compresión paralela al grano y el esfuerzo en tensión, tanto para la madera de los dos SAF analizados (9-SAF y 10-SAF) como en la madera creciendo en una plantación pura (Cuadro 5). En el caso de los dos parámetros de flexión (MOR y MOE) entre la madera de los árboles de 9-SAF y 10-SAF presentan menores valores que los árboles de la condición de 10-PURA (Cuadro 5).

Cuadro 5. Flexión, compresión, dureza, cizalle y tensión en edades de nueve y diez años en SAF comparado con una plantación pura de diez años.

	Propiedad	9- SAF	10-SAF	10-PURA
Dureza	Lateral (N)	1418,32 ^A (18,77)	1457,97 ^A (21,79)	1283,01 ^A (27,22)
	Axial (N)	1704,48 ^A (17,91)	2002,24 ^B (11,43)	1485,06 ^A (27,21)
Cizalle	Esfuerzo en cortante tangencial (MPa)	6,78 ^A (11,35)	6,77 ^A (11,16)	6,65 ^A (17,85)
	Esfuerzo en cortante radial (MPa)	6,10 ^A (15,05)	6,36 ^A (8,68)	6,34 ^A (14,39)
Flexión	MOR (MPa)	28,98 ^A (13,42)	30,23 ^A (11,67)	24,56 ^B (12,41)
	MOE (GPa)	4,07 ^A (12,25)	4,46 ^A (8,50)	3,70 ^B (11,88)
Compresión	MOR (MPa)	16,35 ^A (14,97)	17,19 ^A (21,27)	16,82 ^A (20,89)
Tensión	Esfuerzo en tensión (MPa)	41,30 ^A (32,31)	40,46 ^A (34,98)	49,44 ^A (38,41)

Leyenda: letras diferentes indican diferencias significativas en el nivel de confianza del 95% para cada propiedad. Los valores entre paréntesis representan coeficiente de variación.

Propiedades químicas

En relación a las propiedades químicas presentan diferencias significativas únicamente en lo que corresponde a compuestos solubles en agua fría y a compuestos solubles en etanol-tolueno entre las condiciones 9-SAF con 10-SAF y con 10-PURA, 10-SAF no presenta diferencias estadísticas con 10-PURA. En este caso 9-SAF presenta los valores estadísticos más altos para los compuestos solubles en agua caliente y el menor valor para compuestos solubles en etanol-tolueno (Cuadro 6). Y como se indicó no hay diferencias estadísticas en celulosa, lignina, compuestos solubles en diclorometano, NaOH, agua caliente ni en la cantidad de N, C, S y H (Cuadro 6).

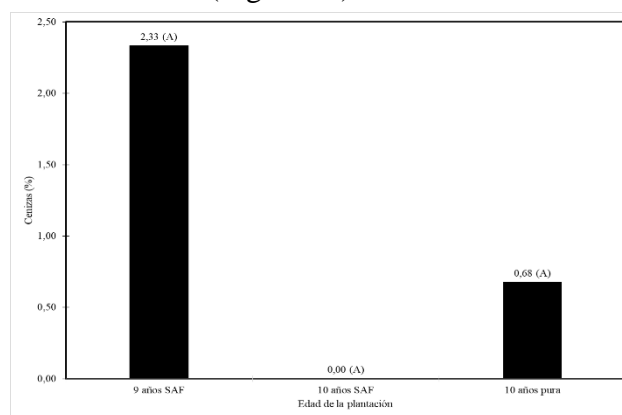
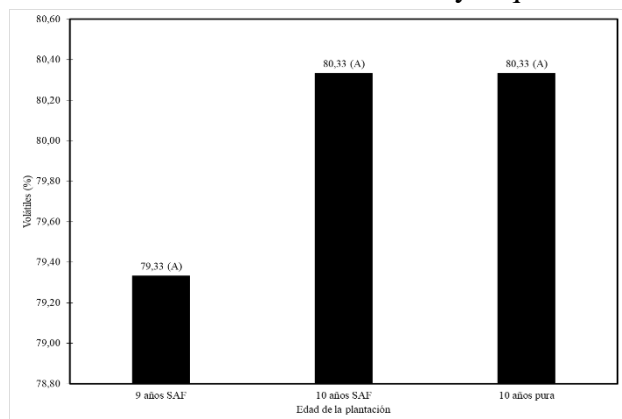
Cuadro 6. Porcentajes determinados a la altura del DAP para celulosa, lignina, nitrógeno, carbono, azufre e hidrógeno y porcentajes de compuestos solubles en agua caliente, agua fría, etanol con tolueno y diclorometano para *C. odorata* de 9 y 10 años en SAF y una pura de 10 años

Parámetro	9- SAF	10-SAF	10-PURA
Celulosa (%)	53,00 ^A (3,36)	52,50 ^A (1,56)	51,83 ^A (1,82)
Compuestos solubles en diclorometano (%)	3,33 ^A (37,42)	2,33 ^A (40,41)	1,67 ^A (56,57)
Lignina (%)	30,89 ^A (0,91)	30,72 ^A (2,63)	28,64 ^A (5,41)
Compuestos solubles en NaOH (%)	3,50 ^A (11,66)	3,50 ^A (34,99)	4,00 ^A (30,62)
Compuestos solubles en agua caliente (%)	7,50 ^A (10,89)	5,00 ^A (21,60)	5,67 ^A (16,64)
Compuestos solubles en agua fría (%)	8,17 ^A (2,89)	4,17 ^B (14,97)	4,83 ^B (34,14)
Compuestos solubles en etanol-tolueno (%)	7,33 ^A (12,86)	12,00 ^B (0,00)	11,33 ^B (8,32)
Nitrógeno (%)	0,15 ^A (0,02)	0,13 ^A (0,02)	0,18 ^A (0,02)
Carbono (%)	45,58 ^A (0,68)	45,65 ^A (0,21)	45,69 ^A (0,97)
Azufre (%)	0,00 ^A (0,00)	0,00 ^A (0,00)	0,00 ^A (0,00)
Hidrógeno (%)	6,34 ^A (0,30)	6,35 ^A (0,60)	6,36 ^A (1,02)

Leyenda: letras diferentes indican diferencias significativas en el nivel de confianza del 95% en relación a cada parámetro. Los valores entre paréntesis representan coeficiente de variación.

Propiedades energéticas

En la evaluación de las propiedades energéticas, se obtuvo que en la variable de porcentaje de volátiles (Figura 4a), no presentó diferencias significativas entre las tres plantaciones analizadas. Para porcentaje de cenizas (Figura 4b), la madera de los árboles de las tres plantaciones, no presentan diferencias estadísticas. En el poder calórico, la madera de los SAF no presentan diferencia entre las edades y a sus vez, la madera de los árboles de la 10-PURA tiene un poder calórico estadísticamente mayor que las condiciones de SAF (Figura 4c).



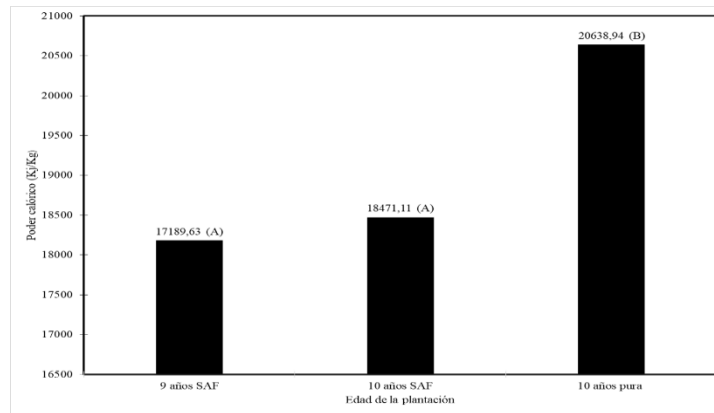


Figura 4. Porcentaje de material volátil (a), de cenizas (b) y poder calórico (b) en madera de *Cedrela odorata* de árboles de nueve y diez años en SAF comparado con una plantación pura de diez años.

Discusión

Propiedades morfológicas

Para las propiedades morfológicas, el presente estudio se comparó con los resultados presentados por otros autores. Por ejemplo, en [20], [14] se reportan valores al DAP del diámetro, porcentaje y espesor de corteza, porcentaje y diámetro de duramen, porcentaje y espesor de albura y porcentaje y diámetro de médula similares a los reportados al cuadro 1. La similitud de los resultados puede deberse a que los tres estudios se realizaron en sistemas agroforestales de cacao con cedro del mismo sitio y han tenido un manejo y fertilización similar. No obstante, cuando se comparan las variables morfológicas de los árboles en SAF con los de la plantación pura de cedro se observa que algunas variables evaluadas (Cuadro 1), de los árboles en SAF son de mayor dimensión que las variables de la plantación pura. Estas diferencias pueden ser atribuidas a la edad y el manejo realizado. Los SAF presentaron un alto porcentaje de duramen en relación a los árboles de la plantación pura (cuadro 1) y esto es importante, ya que este tejido comprende el tipo de madera más importante [23] debido a su mayor durabilidad natural [24]. En [19], se menciona que hay una relación estrecha entre la calidad morfológica y fisiológica de la planta con la dosis de fertilizante aplicada, situación que sucede con los árboles de SAF que han sufrido mayor fertilización.

En lo que corresponde al comportamiento de las variables en relación a la altura de los árboles, los SAF en su mayoría tuvieron un comportamiento morfológico mejor, a excepción de algunas variables como la albura al 25, 50 y 100%, corteza al 0 y 25% y médula al 0 y al 75% (cuadro 2). Esto se debe a que los árboles no muestran una tendencia clara, a veces en aumento, disminución o permaneciendo estable con algunas variables y se considera un valor intrínseco característico de la genética de cada especie [25]. Además del efecto de diversos procesos fisiológicos, condiciones ambientales, fertilidad del suelo y composición genética en [26].

Propiedades físicas

Con respecto a las propiedades físicas, en [27] reportan una densidad básica de $0,33\text{g/cm}^3$, [28] valores de $0,32$ a $0,35\text{g/cm}^3$, pero [29] menciona que una alta densidad básica entre los $0,69$ a $0,76\text{g/cm}^3$. En este estudio los árboles de las plantaciones presentan densidades similares a las reportadas por [27], [28] pero muy inferior a [29] (cuadro 3). La diferencia encontrada con este último autor puede ser atribuido al hecho que las plantaciones muestreadas son árboles jóvenes, los cuales presentan elementos anatómicos diferentes cuando se compara con respecto a la madera que proviene de árboles adultos en [30]. Al comparar la madera de SAF con la plantación pura, no se presentaron diferencias estadísticas en las propiedades de densidad básica (cuadro 3) esto porque este parámetro de la madera se ve afectada principalmente por la edad del cambium y la tasa de crecimiento en [31] y las tres plantaciones tienen edad similar, entre los nueve y diez años, lo cual significa que influyen más en ellas la edad de los árboles que las condiciones del sitio de plantación en [33]. De igual manera el comportamiento fue similar para las tres plantaciones a diferentes alturas, ya que la misma influencia en edad y sitio las afecta otorgándoles un desarrollo muy similar. En [34] mencionan que la densidad básica incrementa con la altura en el árbol para especies con bajo porcentaje de madera tardía, ratificado a que puede ser atribuido a la presencia de nudos en la copa en [35], además de la presencia de madera de compresión, lo que puede originar un aumento en la densidad básica.

En [20] encontraron en su estudio valores para la contracción volumétrica de 6,82 a 9,29%, una contracción tangencial de 4,06 a 4,92% y la contracción radial de 2,53 a 3,56%. En tanto que [14] reportaron una contracción volumétrica de 6,58 a 7,42%, una contracción tangencial de 4,

29 a 5,05% y una contracción radial de 2,54 a 2,88%. Estos estudios muestran resultados que abarcan el rango de contracciones obtenidas en el presente estudio (cuadro 3). Pero al comparar las contracciones obtenidas en los SAF con la plantación pura se observa mayores contracciones en la plantación pura.

Las propiedades físicas (densidad básica y contracciones) se ven afectadas por el espaciamiento y la altura de los árboles en [33], lo cual puede explicar la diferencia con la plantación pura, la cual no ha recibido el manejo silvicultural adecuado en comparación a los otros estudios con los cuales se comparó, además en [25] lo atribuyen a la presencia de madera juvenil que se forma en los anillos cercanos a la médula y que aumenta conforme la altura del árbol y la cual presenta características diferentes a las que presenta la madera madura. En [36] expresan que las contracciones presentan una tendencia irregular, que consiste en contracciones pequeñas en la parte baja del fuste, valores máximos en un tercio de la altura, continuando con una disminución de los valores en la parte alta del árbol.

Contracciones altas presentan menor estabilidad dimensional en [37] y un valor alto de contracción radial y tangencial se interpreta como baja estabilidad dimensional, esto quiere decir que las plantaciones en SAF presentan mayor estabilidad que la plantación pura, ya que presenta menos contracciones que la madera proveniente de los árboles jóvenes.

Propiedades mecánicas

En [14] reportan dureza axial de 1911 a 1998N y lateral de 1054,66 a 1398,56N, en tanto que en [27] reportan en lo que corresponde a dureza lateral 2156 N y axial 3567,2N y dichos autores mencionan que la dureza lateral y axial tienen una correlación con la densidad (a mayor densidad, mayor dureza). Comparando estos estudios con la madera de SAF presentado en el cuadro 4, se observa que presentan un rango muy semejante a excepción de la dureza reportada en [27] el cual es mayor con respecto a las otras dos.

En [20] reportan en cizalle 4,59 a 4,93MPa, la flexión estática en MOR 27,33 a 44,14MPa, MOE 4,3 a 5,77GPa, compresión 12,72 a 23,55MPa, tensión de 41,70 a 44,09MPa, [14] reportan en cizalle 4,07 a 4,46MPa, la flexión estática de MOR 33,01 a 42,72MPa, MOE 4,87 a 5,62GPa,

la compresión 18,32 a 22,00MPa y la tensión de 33,48 a 40,11MPa y en [27] reportan en lo que corresponde para cizalle 5,59 MPa, para flexión estática un MOR de 50,08 MPa y un MOE de 7,25GPa y en compresión paralela reporta un MOR de 39,59MPa. Comparando los tres estudios mencionados con el presente, se observa que presentan un rango muy semejante, pero al compararlo con los datos obtenidos en [38], los cuales reportan que en su estudio los árboles evaluados presentaron valores de dureza blando, mediana resistencia en el MOR, baja resistencia en el MOE, alta resistencia a la compresión paralela y alto esfuerzo al cizallamiento, por lo cual los resultados en este estudio (cuadro 4) se compararon con ellos y dan como resultado valores bajos en la dureza de la madera, baja resistencia en flexión en el MOR y en el MOE, baja resistencia a la compresión paralela y al esfuerzo al cizallamiento. En [1] reporta que el MOE es afectado por el raleo, pero sin mostrar claras tendencias respecto de su intensidad. En [39] los resultados se pueden explicar por la posible mezcla de madera de albura y duramen en las probetas que potencialmente influyen en los resultados.

Propiedades químicas

En [14] reportaron en extractivos en diclorometano de 4,89 a 6,88%, en NaOH de 9,38 a 12,64%, en agua caliente de 12,01 a 12,40%, en agua fría 1,67 a 2,46%, y en etanol con tolueno de 2,73 a 6,08%, porcentaje de en lignina de 29,67 a 31,19%, nitrógeno de 0,27 a 0,35%, en carbón de 47,69 a 49,12%. En tanto que en [40] en plantaciones de cedro, reporta en carbono un porcentaje de 15,68%. En [18] en estudios realizados a dos plantaciones de cedro dieron como resultado en celulosa 41%, en lignina 27% a una edad de 10 años y 28% para 9 años, etanol-tolueno 5%, para 10 años. Para un estudio realizado en aserrín de cedro de 9 y 10 años se encontró respectivamente un porcentaje para celulosa de 40, 85%, para lignina 33,12%, en etanol tolueno de 13,38% y para agua caliente 12,25% en [1].

Los cuatro estudios anteriores se compararon con los resultados del presente estudio (Cuadro 5) y en los porcentajes obtenidos se logró observar que las diferentes plantaciones evaluadas tienen un rango parecido en sus porcentajes de contenido analizado en las variables evaluadas. Sobre lo evaluado en este trabajo, las tres plantaciones comparten resultados muy parecidos y sólo en agua caliente y etanol tolueno se diferencian los SAF con la PURA. Un estudio realizado en

[41], muestra valores de carbono, hidrógeno y nitrógeno donde el rango obtenido en este estudio coincide con ellos (Cuadro 5).

Propiedades de energía

En [14] reportaron en cantidad de ceniza un porcentaje de 0,64 a 1,07%. En [40] encontró en volátiles 83,45% y en cenizas 0,88%. Un estudio realizado por [41] muestra valores de volátiles, cenizas y poder calórico similares a estos, para los cuales el rango obtenido en este estudio se encontró que las variables de energía coincide con ellos (Figura 4). En [42] el poder calórico presente en este estudio lo hace un producto competitivo por su alto valor.

Madera de SAF vrs Plantación pura

En los parámetros evaluados en esta investigación se mostró el potencial que tienen los SAF frente a las plantaciones puras en las variables analizadas, esto como lo explican los autores [7], [13] se debe a la fertilización que aporta el abono, las enmiendas realizadas a los cultivos (en este caso de cacao), así como la aplicación de podas y en general el manejo al que está sometido el producto agrícola, los cuales pueden brindarle a la madera cualidades diferentes a las encontradas en edades más tempranas. La calidad del árbol y su madera está estrechamente relacionada con las etapas de crecimiento, aunado a la calidad del sustrato y el manejo recibido en especial en las primeras etapas de crecimiento [43].

Conclusiones

Se concluye que las propiedades morfológicas de los árboles creciendo en sistemas agroforestales tienen diferencias con los árboles que crecen en plantaciones puras. Se presentan diferencias en el diámetro total, porcentaje de corteza, porcentaje de albura, diámetro y porcentaje de duramen, además de diámetro y porcentaje de médula. Los árboles creciendo en SAF presentaron mayor diámetro a la altura del Dap. Además estos árboles en SAF mostraron menor porcentaje de médula con respecto a los árboles de la plantación pura. En las propiedades físicas en general presentan diferencias estadísticas en todos los parámetros analizados, con la excepción de densidad básica, contenido de humedad verde, contracción tangencial (total y al 12%) y contracción radial (total y al 12%). La madera de los árboles creciendo en plantaciones SAF presentaron menos contracciones que la madera de árboles de plantaciones pura, eso indica

mayor calidad en la madera y seguridad en las piezas fabricadas con este tipo de madera. La madera de los árboles en SAF presentan mayor valor de MOE y MOR en la prueba de flexión, así como en la dureza axial. Con respecto a las propiedades químicas no son afectadas independientemente del sistema de plantación elegido, a excepción de extractos en agua fría y en etanol-tolueno donde en ambos análisis, la madera de los árboles de 9-SAF es estadísticamente diferente a la madera de los árboles de 10-SAF y de 10-PURA. En las propiedades de energía se encontraron diferencia sólo en poder calórico, donde la madera de las condiciones SAF presentan mayor poder calórico que la condición 10-PURA. En general se observó que las plantaciones de nueve y diez años bajo el sistema agroforestal son las que presentan mejores propiedades que los árboles de plantaciones puras de diez años.

Referencias

- [1] M. Rosales-Castro, A. Salazar, A. Santos-García, E. Pérez-López, G. Colltl-Hernández y V. Sánchez-Monsalvo. Chemical composition of leaves and branches of *Cedrela odorata* L. from two forest plantations as a source of lignocellulosic feedstock. *Madera y Bosques*, vol. 22, no.2, pp-131-146, 2016. Available: SciELO online, http://www.scielo.org.mx/article_plus.php?pid=S140504712016000200131&tlng=es&lng=es
- [2] P. Van der Hout. Resource Assessment and Forest Management Plan for the CITES-Listed Species *Cedrela odorata* (red cedar) In Guyana. 2015. Available: ResearchGate, https://www.researchgate.net/publication/301226305_Resource_Assessment_and_Forest_Management_Plan_for_the_CITESListed_Species_Cedrela_odorata_red_cedar_In_Guyana_Report_prepared_for_the_Guyana_Forestry_Commission_within_the_framework_of_the_ITTO-pro
- [3] Instituto Nacional de Bosques. Cedro, *Cedrela odorata*; paquete tecnológico forestal. Guatemala, INAB. 2017. Available en: http://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2802/Technical/CEDROD.pdf
- [4] J. Cordero y D. Boshier. Árboles de Centroamérica: un Manual para extensionistas. CATIE, 2004.
- [5] R. Larrea, H. Posadas y J. Valdez. Growth and Wood yielding of *Cedrela odorata* L. and *Tabebuia donnell-smithii* Rose in San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. *Madera y Bosques*, vol.14, no.2, 2008.
- [6] R. Jaimes, O. Araque, D. Guzmán, A. Mora, W. Espinoza y W. Tezara. Agroforestry systems of timber species and cacao: survival and growth during the early stages. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics* vol.114, no.1, pp-1-11, 2013.

- [7] H. Martínez. Especies para sistemas agroforestales: condiciones para su cultivo “Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono” Fondo Nacional de Financiamiento Forestal, 2015.
- [8] L. Quinto, P. Martínez-Hernández, L. Pimentel-Bribiesca y Rodríguez-Trejos. Planeación de un sistema silvopastoril en Ladera en Huatuso, Veracruz aplicando el método de Nezahualcoyotl. Revista Chapingo. Ciencias Forestales y del Ambiente, vol. 15, no. 2, pp-141-146, 2009.
- [9] M. González-Rojas, R. Murillo-Cruz y C. Ávila. Profitability of *Cedrela odorata* L. in agroforestry systems with coffee in Pérez Zeledón, Costa Rica. Revista de Ciencias Ambientales, vol.52, no.1, pp-129-144, 2018
- [10] N. Mazo y J. Rubiano. Agro-forestry systems as a strategy for managing the Bosque Seco Tropical (Dry Tropical Forest) in southwest Colombia using the systems of geographical information (GIS). Revista colombiana de geografía, vol.25, no.1, pp- 65-77, 2016.
- [11] T. Tschardtke, Y. Clough, S. Bhagwat, D. Buchori, H. Faust, D. Hertel y C. Scherber. Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes: a review. Journal of Applied Ecology, vol.48, no.3, pp-619–629, 2011. Available en: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-2664.2010.01939.x>
- [12] S. Díaz, M. Espinoza, L. Valenzuela, J. Cancino y J. Lasserre. Effet of thinning on growth and some properties of Wood of *Eucalyptus nitens* in a plantation of 15 years old. Madera. Ciencia y tecnología, vol.14, no.3, pp-373-388, 2012.
- [13] C. Alvarado. Efecto de la fertilización orgánica e inorgánica en el rendimiento de un clon de cacao (*Theobroma cacao*) y en la fertilidad del suelo. Trabajo final para optar al grado

de Licenciatura en Ingeniería en Agronomía. Escuela de Agronomía. Tecnológico de Costa Rica, 2016.

- [14] C. Tenorio y R Moya. Evaluation of wood properties of four ages of *Cedrela odorata* trees growing in agroforestry systems with *Theobroma cacao* in Costa Rica. *Agroforestry Systems*. Vol.1, pp-1-16, 2019.
- [15] G. Detlefsen y E. Somarriba, E. Producción agroforestal de maderas en fincas agropecuarias de Centroamérica .CATIE, 2017.
- [16] E. Somarriba, A. Suarez-Islas, W. Calero-Borge, A. Villota, C. Catillo, S. Vílchez, O. Deheuvels y R. Cerda. Cocoa–timber agroforestry systems: *Theobroma cacao*–*Cordia alliodora* in Central América. *Agroforestry Systems* vol.88, no.6, pp-1001-1019, 2014.
- [17] R. Asare, V. Afari-Sefa, Y. Osei-Owusu, y O. Pabi. Cocoa agroforestry for increasing forest connectivity in a fragmented landscape in Ghana *Agroforestry Systems*, vol. 88, no. 6, pp-1143–1156, 2014.
- [18] A. Santos. Evaluación química de subproductos de *Cedrela odorata* L. (cedro rojo) y propuesta de gestión para su aprovechamiento, 2014.
- [19] J. Mateo-Sánchez, R. Bonifacio-Vázquez, S. Pérez-Ríos, J. Capulín-Grande y L. Mohedano-Caballero. Producción de *Cedrela odorata* L en aserrín crudo con diferentes dosis de fertilización, en Tecpan de Galeana, Guerrero. *Ra Ximhai* vol.7, no.002, pp-195-204, 2011. Available en: Ra Ximhai online: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rxm/article/view/26679>
- [20] P. Rigg-Aguilar y R. Moya. Properties of wood from 7-year-old *Cedrela odorata* trees of two different populations growing in agroforestry systems with *Theobroma cacao*. *Madera y Bosques*, vol.24, no.1, pp-1-30, 2018.

- [21] S. Kouakou, R. Marchal, L. Brancheriau, A. Guyot A y D. Guibal. The quality of poplar wood from agroforestry: a comparison with forest plantation. In: Gosme M (ed) 3rd European agroforestry conference. Montpellier, 2016. Available in <https://agritrop.cirad.fr/580654/1/ID580654%20.pdf>
- [22] R. Moya y F. Muñoz. Physical and mechanical properties of eight fast-growing plantation species in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 22, no.3, pp- 317-328, 2010.
- [23] V. Prasad y k. Mariswamy. Heartwood, sapwood and bark content of teak trees grown in Karnataka, India. *Journal of Forestry Research*, vol. 24, no. 4, pp-721-725, 2013.
- [24] F. Niamké, N. Amusant, J. Charpentier, G. Chaix, Y. Baissac, N. Boutahar y C. Allemand. Relationships between biochemical attributes (non-structural carbohydrates and phenolics) and natural durability against fungi in dry teak wood (*Tectona grandis* L. f.). *Annals of Forest Science*, vol. 68, no.1, pp-201-211, 2011.
- [25] Zobel, B. y J. Talbert. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Limusa. México, D.F. pp-413-424, 1994.
- [26] A. Berrocal, J. Gaitan- Alvarez, R. Moya, D. Fernández- Sólis y E. Ortiz-Malavassi. Development of heartwood, sapwood, bark, pith and specific gravity of teak (*Tectona grandis*) in fast-growing plantations in Costa Rica. *Journal of Forestry Research*, pp-1-10, 2018 <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0849->

- [27] MAE, FAO. Propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de 93 especies forestales. Ecuador-Quito, p-105, 2014
- [28] D. Yeboah, A. Burton, A. Storer, E. Opuni-Frimpong. Variation in wood density and carbon content of tropical plantation tree species from Ghana. *New For*, vol.45, no.1, pp-35–52, (2014). Available en; <https://link.springer.com/article/10.1007/s11056-013-9390-8>
- [29] N. Torelli. “Estudio promocional de 43 especies forestales tropicales mexicanas”. Programa de Cooperación Científica y Técnica México-Yugoslavia. P-73, 1982
- [30] J. Oliveira y J. Silva. Variação radial da retratibilidade e densidades básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm, *Revista Árvore*, Vicosa-MG. vol.27, no. 3, pp-381-385, 2003.
- [31] R. Moya. Influencia de la edad del cambium, tasa de crecimiento y nivel de precipitación sobre la densidad básica de la teca en Costa Rica. *Madera y Bosques*, vol. 8, no.1, pp-39-49, 2002.
- [33] R. Moya y V. Arce. Efecto del espaciamiento en plantación sobre dos propiedades físicas de madera de teca a lo largo del fuste. *Madera y Bosques* vol. 9, no. 2, pp-15-27, 2003.
- [34] A. Brolin, A. Norén y E. Stahl. Wood and Pulp Characteristics of Juvenile Norway spruce: A Comparison Between a Forest and Agricultural Stand. *Tappi Journal*. Vol. 78, no. 4, pp-203-214, 1995.
- [35] A. Panshin y De Zeeuw. Textbook of wood technology. McGraw-Hill. New York. U.S.A 4th edition. pp-202-204 y 249- 281, 1980.

- [36] T. Choong, J. Foog y C. Pollock. Variation in shrinkage properties of second growth baldcypres and Tupelo gum. *Wood and Fiber Science*. Vol. 21, no. 1, pp-17-29, 1989.
- [37] F. Ruiz-Aquino, M. Marcos, J. González-Peña, I. Valdez-Hernández y A. Romero-Manzanares. Estructura anatómica de la madera de dos encinos de Oaxaca México. *Madera y Bosques* vol. 22, no. 1, pp-177-189, 2016.
- [38] J. Rivero y R. Moya. Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Tectona grandis* Linn. F. (teca), proveniente de una plantación de ocho años de edad en Cochabamba, Bolivia Kurú: Revista Forestal. Vol. 3, no. 9, pp-1-14, 2006.
<https://www.researchgate.net/publication/276206695>
- [39] J. Nájera., Z. Vargas, J. Méndez y J. Graciano. Propiedades físicas y mecánicas de la madera en *Quercus laeta* Liemb. De El Salto, Durango. *Ra Ximhai* vol. 1, no. 003, pp-559-576, 2005
- [40] N. Serret-Guasch, G. Giralt-Ortega y M. Quintero-Ríos. Characterization of Sawdust of different Woods. *Tecnología Química. RTQ* vol.36 no.3 Santiago de Cuba sep.-dic.2016
- [41] F. Márquez, T. Cordero, J. Rodríguez y J. Rodríguez. Estudio del potencial energético de biomasa *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* (Pc) Y *Pinus tropicalis* Morelet (Pt); *Eucaliptus saligna* Smith (Es), *Eucalyptus citriodora* Hook (Ec) y *Eucalytus*. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, vol. 7, no. 1, pp-83-89, 2001

- [42] N. Romo, A. Toro, L. Flores y A. Cañas. Evaluation of physicochemical properties and termal in stems coffee and its economic analysis for the production of solid pellets as biofuel. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, no. 10, pp-79-91, 2011.
- [43] P. Negreros-Castillo, M. Apocada-Martínez y C. Mize. Effect of substrate and density on the quality of seedlings of Mexican cedar, mahogany and roble (*Tabebuia*). *Madera y bosques*, vol.16, no. 2, pp-7-18, 2010.