

Tecnológico de Costa Rica

Escuela De Ingeniería Forestal

Proyecto final de Graduación para optar por el título de Ingeniería Forestal con el
grado académico de Licenciatura

**Efecto del proceso de secado al aire en la resistencia mecánica
de las uniones junta de dedos no estructural, para madera de
Cordia alliodora (Ruiz & Pav.) Oken**

María José Cervantes Calderón

Cartago, Costa Rica

2017

Tecnológico De Costa Rica

Escuela De Ingeniería Forestal

Proyecto final de Graduación para optar por el título de Ingeniería Forestal con el
grado académico de Licenciatura

**Efecto del proceso de secado al aire en la resistencia mecánica
de las uniones junta de dedos no estructural, para madera de
Cordia alliodora (Ruiz & Pav.) Oken**

María José Cervantes Calderón

Cartago, Costa Rica

2017



Este obra está bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Efecto del proceso de secado al aire en la resistencia mecánica de las uniones junta de dedos no estructural, para madera de *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken

Resumen

María José Cervantes Calderón¹

La industria forestal, especialmente en el sector construcción, debe comprometerse a la mejora continua de sus procesos y productos, fortaleciendo su calidad para competir con otros materiales del mismo sector, el presente estudio evalúa el efecto del secado al aire de *Cordia alliodora* en la resistencia mecánica de uniones junta dedos. Se estableció un ensayo de secado al aire con 4 pilas, a diferentes espesores de tablas y separadores, con un control de humedad en la madera y reporte de condiciones ambientales, en el cantón de Oreamuno, Cartago, Costa Rica. Las piezas secadas fueron procesadas para realizar uniones junta dedos, junto con piezas en condición húmeda, se realizaron probetas ajustadas a la norma ASTM- D 5572 - 95 (2005), las cuales se sometieron a esfuerzos de tensión y flexión para determinar el módulo de ruptura (MPa), módulo de elasticidad (GPa), resistencia a la tensión (MPa) y porcentaje de falla en la madera. Se obtuvo un tiempo de secado 32 días, llegando a un contenido de humedad en equilibrio de 15,96%. La madera con secado previo obtuvo mejores propiedades mecánicas que la madera sin secado, con un MOR promedio de 26,21 MPa con diferencia significativa con las piezas en condición verde (16,36 MPa), con resistencia a la tensión de 42,21 MPa promedio y 14,13 MPa para la madera en verde. Las probetas sin secar obtuvieron 100% de fallas en el rango de 0% a 70% de falla en madera, es decir, con mayor falla en la línea de cola. El MOE presentó diferencia no significativa, con valores promedio de

¹ Cervantes-Calderón, M. (2017). *Efecto del proceso de secado al aire en la resistencia mecánica de las uniones junta de dedos no estructural, para madera de Cordia alliodora (Ruiz & Ppav.) Oken*. (tesis de licenciatura). Tecnológico de Costa Rica, Cartago.

2122,03 MPa y 2137,26 MPa, para la madera seca y húmeda, respectivamente. Finalmente se encontró que el proceso de secado y aplicación de adhesivo para tal condición, mejora la resistencia mecánica de las uniones junta de dedos en madera de *Cordia alliodora*.

Palabras clave

Cordia alliodora, madera, secado al aire, sistemas de unión, resistencia mecánica

Abstract

The forest industry, specifically in the building sector, needs to be compromised to the continuous improvement of its procedures and products, strengthening its quality in order to compete with other materials from the same sector, the next study evaluates the effect of the air drying process of *Cordia alliodora* in the mechanical resistance of the joint finger. Furthermore, it was established an air drying test using 4 stacks of wood, with different thicknesses and separators, also using an humidity control in the wood and the weather report of Oreamuno, Cartago, Costa Rica. In addition, the pieces that were dried have been used to create the finger joint and the ones that were with humidity were used to make tight specimen using the steps stipulated in the ASTM-D 5572 – 95 (2005), besides both of the pieces have been under tension stresses and bending tests in order to determine the modulus of rupture (MPa), modulus of elasticity (GPa), the resistance under tension (MPa) and the percentage of failure on the wood. The time of the drying process was 32 days, getting a total amount of 15,96% of the humidity in equilibrium. The wood that was under the air drying process obtained better mechanical properties than the ones that didn't use that process, for instance, it had a MOR average of 26,21 MPa with a significant difference within the pieces in humid condition of 16,36 MPa, also, an average of the tension resistance of 42,21 MPa for the pieces that were dried and the humid pieces had an average of 14,14 MPa. The specimen without the drying process had a 100% of failure within the rank of 0% and 70% of the failure on the wood. The MOE had an indifferent behavior statically, with results of 2122,03 MPa and 2137,26 MPa for the dried wood and the humid wood, respectively. To conclude, as a result the air

drying process and the proper bonding using the dried wood, have shown that it improves the mechanical resistance of the finger joints of wood of *Cordia alliodora*

Key words

Cordia alliodora, wood, air-dried, bonding systems, mechanical strength


CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por el Dr. Freddy Muñoz, Dr. Róger Moya, Dr. Alexander Berrocal y Sr. Luis Roberto Navarro como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Efecto del proceso de secado al aire en la resistencia mecánica de las uniones junta de dedos no estructural, para madera de *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken



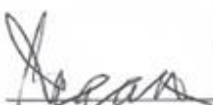
Dr. Freddy Muñoz
Escuela de Ingeniería Forestal
Director de tesis



Dr. Róger Moya
Escuela de Ingeniería Forestal
Lector




Dr. Alexander Berrocal
Escuela de Ingeniería Forestal
Lector



Sr. Luis Navarro
Gerente de ventas
Grupo empresarial El Almendro



Lc. Dorian Carvajal Vanegas.
Coordinador Trabajo de Graduación



Maria José Cervantes C
Estudiante

Dedicatoria

A mi madre, Ana Lucía, mi motor de vida.

Agradecimientos

Al Grupo Empresarial El Almendro y sus colaboradores, por su cooperación en la ejecución del proyecto, así como su financiamiento.

Al profesor Freddy Muñoz, tutor de tesis, por su gran colaboración, confianza y mostrar siempre su disposición para ayudarme.

A todos los profesores y colaboradores de la Escuela de Ingeniería forestal y miembros del CIF, por compartir sus conocimientos, brindarme su ayuda y guiarme en el camino.

A mi madre, hermanos y demás familia, por creer en mí y mostrar su apoyo siempre.

A Alberto Sánchez Alvarado, por ser un motor de inspiración y ejemplo a seguir, tanto en mi vida personal como deportiva.

A Ana Lucía Hernández por brindarme su confianza, conocimientos y ayuda durante mis estudios para poder concluir de manera exitosa.

A Yeison Cortés, Brandon Blanco, Sharon Villalobos, Yerlin Vargas, Iván Ávila y demás compañeros, por hacer de esta etapa la mejor, con proyectos exitosos y momentos memorables.

Índice General

Resumen	i
Abstract	ii
Introducción.....	1
Material y métodos	2
Secado al aire exploratorio	2
Contenido de Humedad	3
Uniones Junta de dedos	5
Determinación del módulo de ruptura y módulo elástico en flexión.	6
Determinación de la resistencia a la tensión y porcentaje de falla en la línea de cola en tensión.....	8
Análisis de datos	10
Resultados	10
Secado al aire	10
Módulo de ruptura y módulo elástico en flexión.	12
Determinación resistencia a la tensión y porcentaje de falla en la madera en tensión	14
Discusión.....	16
Secado al aire	16
Determinación módulo de ruptura y módulo elástico	17
Determinación resistencia a la tensión y porcentaje de falla en la madera en tensión	18
Conclusiones.....	20
Recomendaciones.....	21
Referencias	22

Índice de cuadros

Cuadro 1. Dimensiones de las tablas a secar de cada pila de secado para madera de <i>C. alliodora</i>	3
Cuadro 2. Tamaño de muestra (n) de cada pila y muestra testigo y su contenido de humedad en porcentaje promedio.	8
Cuadro 3. Tamaño de muestra (n) de cada pila y muestra testigo y su contenido de humedad en porcentaje promedio.	9
Cuadro 4. Velocidad del viento de entrada y salida promedio de cada pila de secado, humedad relativa, temperatura y precipitación diaria promedio del período de ensayo de secado al aire de <i>C. alliodora</i>	10
Cuadro 5. Contenido de humedad inicial y final en porcentaje, tiempo de secado en días y la razón de pérdida de humedad diaria de cada pila de secado al aire de madera de <i>C. alliodora</i>	11
Cuadro 6. Carga máxima soportada en kilogramos por probetas con uniones junta de dedos en madera de <i>C. alliodora</i> en dos condiciones de humedad.	13
Cuadro 7. Carga máxima aplicada en kilogramos (kg), resistencia a la tensión en megapascuales (MPa) y porcentaje de falla en la línea de cola de probetas con unión junta de dedos de madera de <i>C. alliodora</i> con 2 tipos de aplicaciones de adhesivo.	14
Cuadro 8. Porcentaje de probetas falladas de acuerdo al porcentaje de falla en la madera de probetas con uniones junta de dedos de <i>C. alliodora</i>	15

Índice de figuras

Figura 1. Perfil del diente de la unión tipo junta de dedos	6
Figura 2. Tipos de falla en pruebas de tensión, A. falla 100 % en madera, B falla de 99% a 70% en la madera y C falla en la madera menor a 70%.	9
Figura 3. Curvas de secado al aire para madera de C. alliodora en dos espesores	12
Figura 4. Módulo de elasticidad (GPa) y módulo de ruptura (MPa) de muestras de uniones junta de dedos de madera de C. alliodora con 2 tipos de aplicaciones de adhesivo.....	13

Introducción

El uso de la madera en el sector construcción, ha sido sustituido principalmente por materiales como concreto, metal y plástico y sus derivados, los cuales son de origen no renovable y con alto consumo energético para su producción (Coto, 2015). Además, Abarca y Leandro (2016), mencionan que algunos de estos materiales no pueden ser reutilizados ni reciclados, como el concreto, que es uno de los materiales mayormente desechados sin tratamiento en las construcciones. Para el año 2012 se estimó que el 24,3% del consumo de madera en Costa Rica se destinó para construcción (Barrantes y Ugalde, 2013) y para el 2016 este porcentaje aumentó a 25,1%, del cual en su mayoría es utilizado para artesanado, molduras, reglas, cuadro, alfajillas entre otros, lo que indica que se destina la madera para propósitos estructurales y productos de una mayor vida útil, dándoles un mayor valor agregado (Arce y Barrantes, 2006; Barrantes y Ugalde, 2016).

La madera posee ventajas sobre otros materiales, al ser biodegradable, de origen renovable, con capacidad de fijar carbono y ser más reutilizable en la actividad de construcción (Tsoumis, 1991). La madera de *Cordia alliodora* (laurel) es una de las maderas más utilizadas en el país (Barrantes y Ugalde, 2016), cuyas propiedades mecánicas y físicas son aptas para la construcción principalmente y otros usos como para la ebanistería, con un alto valor económico para el país, además dicha especie es de fácil reproducción y se puede encontrar en distintos escenarios: potreros, sistemas agroforestales, plantaciones y bosque natural (Cordero y Boshier, 2003).

Moya-Roque y Gonzáles-Trejos (2006), indican que el sector forestal siempre ha carecido en la implementación de nuevas tecnologías y renovación de procesos y productos para el uso de la madera, una de las razones por la que el consumo general de este material ha decaído, además de que los costos se incrementan a causa de la falta innovación. Uno de los procesos principales en la manufactura de la madera es el secado, el cual se considera vital para que la madera adquiera estabilidad dimensional, mejora de propiedades físicas y mecánica y evitar la incidencia de plagas (Muñoz, 2008).

La creación de nuevos métodos ingenieriles para la utilización de la madera debe ser continua, ya que es un material que posee buenas propiedades mecánicas, las cuales pueden ser mejoradas con nuevas técnicas y procesos (Piao y Shupe, 2016).

Un ejemplo de estos nuevos métodos son las uniones tipo junta de dedos, que se definen como la unión de 2 piezas de madera en dirección paralela al grano por extremos dentados (Jokerst, 1981). Es de suma importancia que el sector de la industria forestal se comprometa a que estos nuevos métodos sean mejorados desde la obtención del material hasta su procesamiento primario y secundario, para garantizar productos de mayor calidad.

El presente proyecto tiene como objetivo general evaluar el efecto del proceso de secado al aire para la madera *C. alliodora* en la resistencia mecánica, con pruebas de flexión y tensión, de las uniones tipo junta de dedos no estructural para productos moldurados.

Material y métodos

El presente estudio se realizó durante el segundo semestre del 2017, en la planta de procesamiento del Grupo Empresarial El Almendro (<http://almendrocr.com/es/>), ubicada en San Rafael de Oreamuno, Cartago, Costa Rica (9°51'12,6"N 83°53'39,0" O). Dicha empresa se dedica a la venta al por mayor y al detalle en proyectos y cadenas ferreteras de madera y su vez brinda servicios de aserrío, cepillado y alistados especiales. El aserradero cuenta con una capacidad de producción de 75.76 m³ diarios.

Secado al aire exploratorio

Se realizó un ensayo de secado al aire exploratorio, bajo las condiciones climáticas del sitio, la zona posee una altitud media de 1435 msnm, una precipitación media anual entre 1400 a 2000 mm (INDER, 2016), con un total de 3 meses secos (enero – marzo), se registra una temperatura máxima de 22,5 °C y mínima de 12,5 °C y humedad relativa de 84% (Rojas, 1985).

Se estableció un diseño completo al azar, con cuatro diseños de pilas horizontales de secado al aire, tratamientos, los cuales contaron con variaciones únicamente en el espesor de las tablas a secar, así como también el grosor del separador. En el cuadro 1 se muestran las dimensiones de las tablas que fueron sometidas al secado al aire, y su correspondiente espesor de separador, según el tratamiento

Cuadro 1. Dimensiones de las tablas a secar de cada tratamiento de secado experimental para madera de *C. alliodora*.

Tratamiento	Largo (m)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Separador (mm)
1	1,0	72,0	25,0	25,0
2	1,0	72,0	25,0	12,0
3	0,84	72,0	12,0	25,0
4	0,84	72,0	12,0	12,0

Para los tratamientos uno y dos las dimensiones fueron de 0,75 m de alto por 1 m de ancho y 1 m de largo, y para los tratamientos tres y cuatro las dimensiones fueron menores, con 0,60 m de alto, 1 m de ancho y un largo de 0,84 m.

Contenido de Humedad

Se evaluó el porcentaje de contenido de humedad inicial (CHI) de cada pila, por lo que se seleccionó de forma aleatoria dos muestras testigo, se tomó una tabla por el lado donde ingresa la circulación del aire y otra por donde éste sale (extremos opuestos), éstas fueron debidamente identificadas. Se prepararon dos probetas por pieza de cinco centímetros de largo, 7,2 de ancho y espesor de acuerdo a la pila (JUNAC, 1989) y de las mismas se obtuvo una tabla de 20 cm de largo para llevar el control de humedad diario. Las probetas fueron pesadas (peso inicial) y sometidas a una temperatura de aproximadamente 103° C por 24 horas, para posteriormente pesarlas nuevamente (peso final), de acuerdo a la norma ASTM D1442-92 (2003), se obtuvo dicho valor con la ecuación 1:

$$CH = \frac{P_i - P_f}{P_f} \times 100 \quad (1)$$

Donde

CH= contenido de humedad (%)

Pi= peso inicial (gramos)

Pf= peso final (gramos)

Se llevó a cabo un control del contenido de humedad semanal, donde se realizó la medición del peso en gramos de las tablas seleccionadas como muestras testigo. La medición se realizó con una balanza digital en el mismo sitio donde se ubicaron las pilas. Según Rietz y Page (1972) el tiempo de secado se determina cuando el peso de una pieza de madera sea constante, por lo que las muestras testigo fueron pesadas hasta que llegaron a esta condición, para esto, a partir del contenido de humedad inicial se determinó un peso seco calculado para obtener el CH según el peso diario, para ello se utilizó la siguiente fórmula

$$P_o = (P_d / (1 + (\frac{CH_i}{100}))) \quad (2)$$

Donde

Po= peso seco calculado (gramos)

Pd= peso de cada medición (gramos)

CH_i= contenido de humedad inicial (%)

Las mediciones se realizaron al menos 3 veces por semana con el propósito de obtener el comportamiento de la pérdida de humedad mediante curvas de secado, en las mismas se realizó la toma de datos de las condiciones ambientales del lugar de ensayo: temperatura, humedad relativa y velocidad del viento de entrada y salida de cada pila, dichos datos fueron obtenidos con un termo-higrómetro y anemómetro respectivamente.

Al terminar el proceso de secado se llevaron las piezas testigo a la estufa a una temperatura aproximada de 103° C por 24 horas, para obtener el peso seco real y con ello ajustar las curvas de secado con las mediciones realizadas.

Se determinó la velocidad de secado o la razón de pérdida diaria de cada tratamiento, la fórmula 3 muestra el cálculo respectivo

$$\% P = (CH_i - CH_f)/t \quad (3)$$

Donde:

CH_i = contenido de humedad inicial (%)

CH_f = contenido de humedad final (%)

t = tiempo para llegar al contenido de humedad en equilibrio, en días

Uniones Junta de dedos

El uso principal de la madera de laurel en la Empresa El Almendro, es para uniones tipo juntas de dedos no estructurales para productos moldurados, por lo tanto, para cada tratamiento se realizaron dos pruebas de resistencia mecánica: tensión y flexión, con el propósito de evaluar las uniones tipo junta de dedos.

La empresa actualmente no posee un sistema de secado definido por su nivel de demanda, realizan la recuperación de madera (uniones de junta de dedos) con madera en condición húmeda. Por lo anterior se aplicaron pruebas de resistencia mecánica, con flexión y tensión, para probetas con uniones de junta de dedos en condición seca y probetas con madera en condición húmeda (testigo).

Las uniones fueron procesadas en cortadora de uniones junta de dedos modelo MX3510A, en la figura 1 se muestra el perfil del diente realizado por dicha máquina.

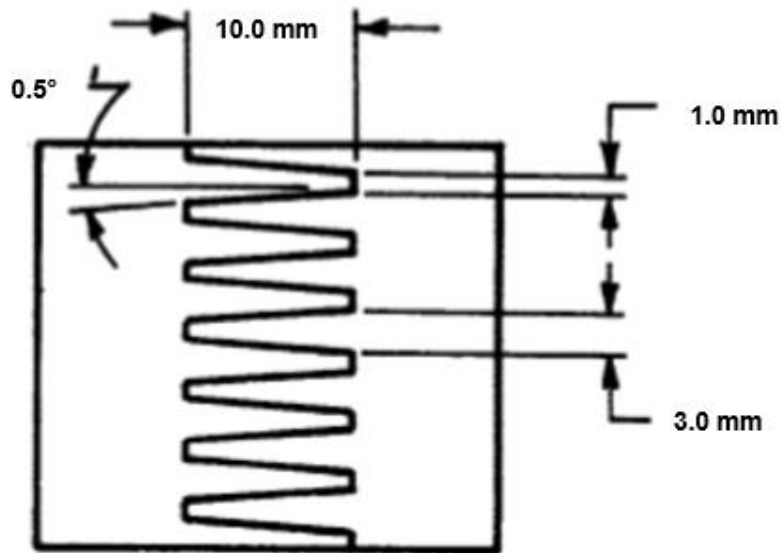


Figura 1. Perfil del diente de la unión tipo junta de dedos

Las probetas tomadas como muestras testigos fueron unidas con un adhesivo de Poliuretano Multipropósito 3M™ 5010, para aplicación en madera con condición húmeda, mientras que para las probetas que fueron sometidas al ensayo de secado previo se utilizó un adhesivo PVA monocomponente precatalizado SUR™ D-3, para aplicación en piezas secas.

Determinación del módulo de ruptura y módulo elástico en flexión.

Para la determinación del módulo de ruptura y el elástico se realizaron pruebas de flexión, las cuales fueron realizadas en la máquina de ensayo Universal Tinius Olsen Horizon H10KT, con probetas tomadas de cada pila secado y de la muestra testigo, de dimensiones de 12 mm x 19 mm con un 27 cm de luz entre apoyo y una velocidad de carga de 12,7 mm/ minuto, según la norma ASTM D 5572 – 95 (2005). Se determinó, a partir de los datos obtenidos por el software de la máquina de ensayos, el módulo de ruptura con la fórmula 4 (ASTM, 2005).

$$MOR = P / (bd^2) \quad (4)$$

Donde:

MOR= módulo de ruptura (Megapascales)

P= carga máxima aplicada (Newton)

l = luz entre apoyos (centímetros)

b= ancho (centímetros)

d= espesor (centímetros)

El modulo elástico se determinó utilizando la fórmula 5, utilizando la curva de deflexión brindada por el software de la máquina de ensayos.

$$MOE = \frac{Plp * L^3}{4 * b * d^3 * Ylp} * 0,0980665 \quad (5)$$

Donde

MOE: módulo elástico en megapascales

Plp: carga en el límite proporcional (kilogramos)

L: luz entre apoyos (centímetros)

b: ancho de la probeta (centímetros)

d: espesor de la probeta (centímetros)

Ylp: deformación al eje neutro (milímetros)

Se utilizó una cantidad de probetas diferentes por tratamiento y se determinó el contenido de humedad promedio por cada uno de estos grupos (ASTM, 2003), el cuadro 2 indica el tamaño de muestra (n) y contenido de humedad de cada tratamiento de las probetas sometidas a las pruebas de flexión.

Cuadro 2. Tamaño de muestra (n) de tratamiento y su contenido de humedad en porcentaje promedio.

Condición	Tratamiento	n	CH%
Seco	1	27	16,79
	2	26	17,75
	3	36	16,83
	4	35	17,50
Verde	Testigo	20	60,93
Total		144	

Determinación de la resistencia a la tensión y porcentaje de falla en la línea de cola en tensión

Se sometieron probetas de dimensiones de 12 mm x 6 mm x 254 mm a pruebas de tensión llevadas a cabo con la máquina de ensayo universal Tinius Olsen Horizon H10KT a una velocidad de carga de 12,7 mm/ min, se realizó el ensayo de acuerdo a la norma ASTM D 5572 – 95 (2005). A partir de los datos mostrados por el software de la máquina de ensayos, se calculó la resistencia a la tensión de acuerdo a la fórmula 4 (ASTM, 2005).

$$T = \frac{f_{mx}}{l*b} \quad (6)$$

Donde:

T= resistencia a la tensión (Megapascales)

F_{mx} = fuerza máxima aplicada (Newton)

l = longitud de superficie de ensayo pegada (milímetros)

b = anchura de superficie de ensayo pegada (milímetros)

Para cada tratamiento se determinó el CH promedio de acuerdo a la norma ASTM D1442-92 (ASTM, 2003). El Cuadro 4 muestra la cantidad de probetas por grupo y su contenido de humedad promedio.

Cuadro 3. Tamaño de muestra (n) de cada tratamiento y su contenido de humedad en porcentaje promedio.

Condición	Tratamiento	n	CH %
Seco	1	28	17,15
	2	25	16,15
	3	37	15,70
	4	34	15,87
Verde	Testigo	30	80,05
Total		154	CH %

De forma visual, se clasificó, cada probeta fallada de acuerdo al porcentaje de falla en la madera que presentó, la Figura 2 muestra el parámetro de clasificación utilizado (ASTM, 2005).

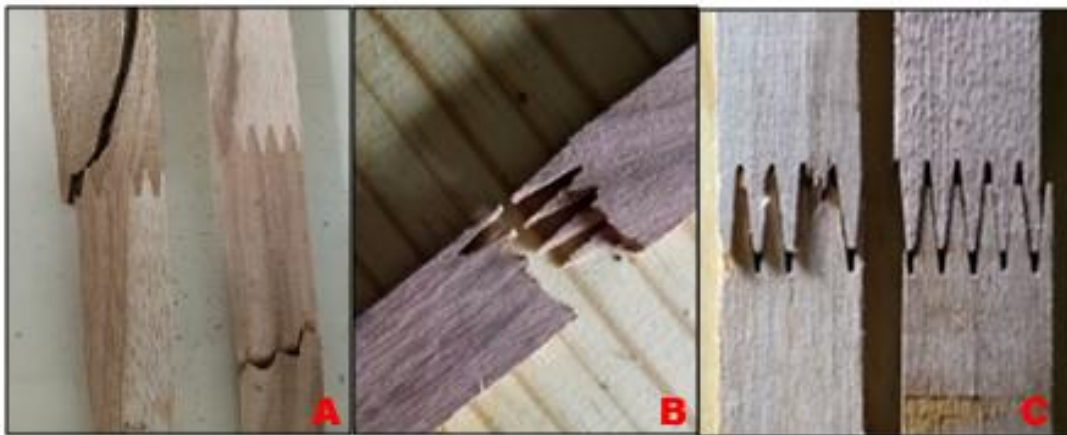


Figura 2. Tipos de falla en pruebas de tensión, A. falla 100 % en madera, B falla de 99% a 70% en la madera y C falla en la madera menor a 70%.

Análisis de datos

Se aplicó un análisis de varianza (ANDEVA) para comprobar si existe un efecto positivo del secado de la madera o no en el módulo de ruptura y módulo elástico en flexión y resistencia a la tensión de las uniones junta de dedos con respecto a las uniones realizadas con madera en condición húmeda, además de una comprobación Tukey ($p < 0,05$).

Resultados

Secado al aire

El período de secado constó de 32 días, comprendiendo los meses de julio y agosto, que según INDER, 2016, la estación lluviosa está presente. Sin embargo, las condiciones ambientales fueron favorables para este tipo de secado, el Cuadro 4 se muestra las condiciones ambientales presentes durante el secado.

Cuadro 4. Velocidad del viento de entrada y salida promedio de cada tratamiento de secado, humedad relativa, temperatura y precipitación diaria promedio del período de ensayo de secado al aire de *C. alliodora*.

Tratamiento	Velocidad del viento de entrada (km/h)	Velocidad del viento de salida (km/h)	Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)	Precipitación (mm/día)
1	8,31	1,64			
2	8,39	3,22	67,28 ± 8,27	24,89 ± 1,61	9,21
3	8,50	3,56			
4	7,81	1,33			

Tomando como referencia la tabla psicométrica propuesta por Muñoz (2006), el contenido de humedad en equilibrio, bajo las condiciones ambientales históricas y actuales, es de aproximadamente de 16%, por lo que, se determina el tiempo de secado al número de días en el que las muestras llegaron a este porcentaje de humedad.

El Cuadro 5 muestra el contenido de humedad inicial y final, el tiempo de secado en días y la razón de pérdida de humedad diaria de cada tratamiento; se puede observar que el tratamiento 2 obtuvo la mayor razón de pérdida de humedad, mientras que el tratamiento 4 posee la menor velocidad de secado.

Cuadro 5. Contenido de humedad inicial y final en porcentaje, tiempo de secado en días y la razón de pérdida de humedad diaria de cada tratamiento de secado al aire de madera de *C. alliodora*.

Tratamiento	Contenido de Humedad Inicial (%)	Contenido de Humedad Final (%)	Tiempo (días)	Razón de pérdida diaria (%)
1	131,70	15,42	29	4,01
2	152,02	16,34	32	4,24
3	98,87	15,60	25	3,33
4	120,97	16,46	25	4,18

El comportamiento de la pérdida de humedad de cada tratamiento se puede observar en la Figura 3, donde en los primeros días se da una rápida pérdida de agua antes de llegar a un punto de equilibrio, es decir, llegar al contenido de humedad en equilibrio de acuerdo a las condiciones ambientales. Los tratamientos 3 y 4 alcanzaron un valor constante a los 10 – 11 días, lo cual se debe a que ambas poseen las tablas el menor espesor (1,2 cm), mientras que las pilas 1 y 2 tardaron aproximadamente el doble de días para llegar a tal condición, y las cuales poseen el doble de espesor (2,54 cm).

La figura 3 muestra el comportamiento de la pérdida de humedad en la madera de las 4 pilas establecidas en el ensayo de secado al aire para madera de laurel.

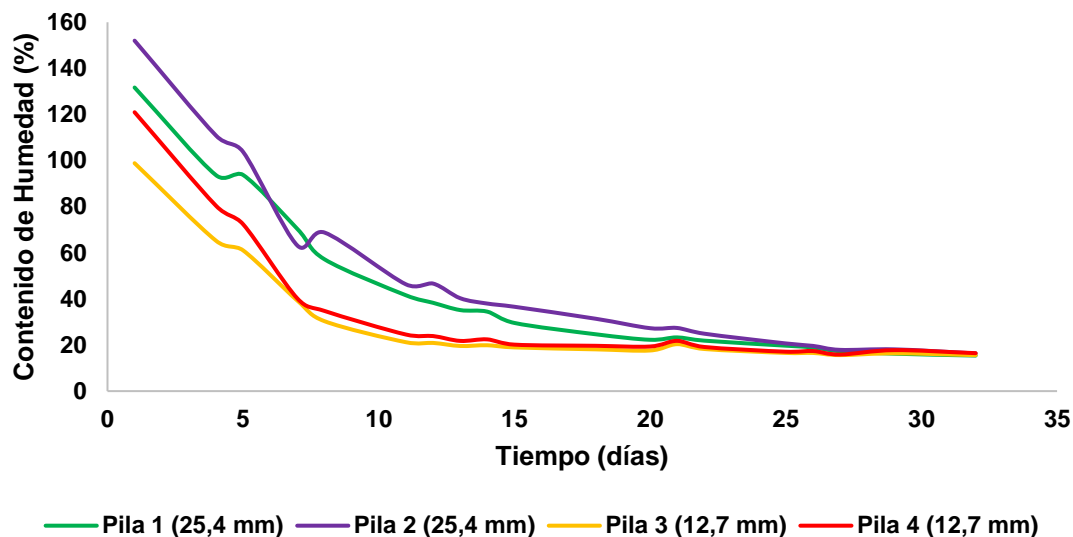


Figura 3. Curvas de secado al aire para madera de *C. alliodora* en dos espesores.

Cabe destacar, que dentro de las curvas de secado se muestran “picos” donde aumenta el CH de forma anormal, esto se debe a que durante el período de secado se presentaron lluvias fuertes, típicas de la época, y la humedad relativa en el ambiente aumenta considerablemente y parte de ella es absorbida por la madera, por lo que el contenido de humedad de la madera se eleva.

Módulo de ruptura y módulo elástico en flexión.

La figura 4 muestra los valores promedio de módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de ruptura (MOR) en megapascales (MPa), producto de las pruebas de flexión. El tratamiento 1 muestra el mayor valor de módulo de ruptura, con un valor de 28,3 MPa, por otra parte, la muestra testigo mostró el valor más bajo de MOR, 16,36 MPa con diferencia significativa en comparación con las probetas sometidas al proceso de secado, las cuales obtuvieron valores de 25,4, 26,22 y 24,9 MPa para las pilas 2, 3, y 4 respectivamente.

En cuanto los valores de MOE, el tratamiento 1 mostró el valor más bajo, con 1904,41 MPa, en cuanto a la muestra testigo presentó un valor de 2137,26 MPa, la cual no muestra diferencia significativa con probetas en condición seca, las cuales obtuvieron los valores de 2060,97, 2092,38 y 2430,38 MPa respectivamente para los tratamientos 2, 3 y 4.

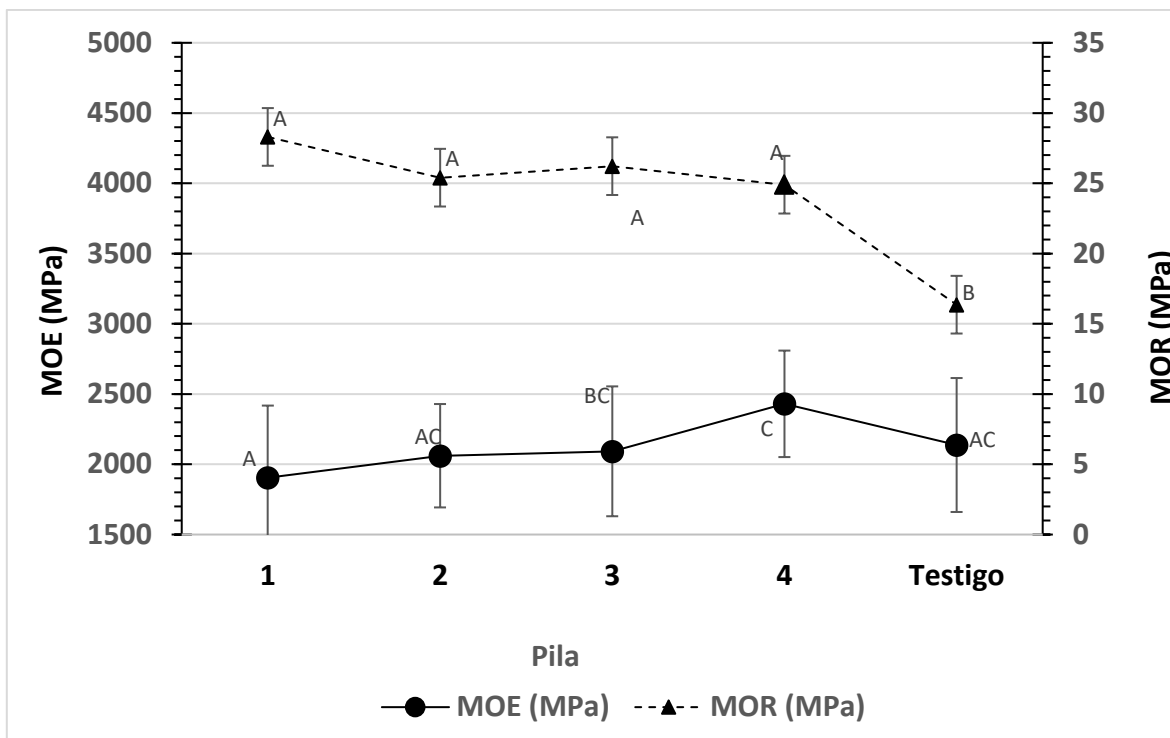


Figura 4. Módulo de elasticidad (MPa) y módulo de ruptura (MPa) de muestras de uniones junta de dedos de madera de *C. alliodora* en 2 condiciones de humedad.

*Valores con letra diferente presentan diferencia significativa para un nivel de significancia del 95%.

Los valores de carga máxima soportada en flexión se encuentran el cuadro 6, donde las probetas secadas al aire obtuvieron los valores mayores con diferencia significativa a las probetas en condición húmeda.

Cuadro 6. Carga máxima soportada en kilogramos por probetas con uniones junta de dedos en madera de *C. alliodora* en dos condiciones de humedad.

Condición	Tratamiento	Carga máxima (kg)	Desviación estándar (kg)	Coefficiente de variación (%)
Seco	1	25,73 ^A	4,60	17,90
	2	27,10 ^A	4,68	17,25
	3	27,28 ^A	5,67	20,78
	4	29,24 ^A	5,96	20,37
Verde	Testigo	16,90 ^B	3,92	23,20

*Valores con letra diferente presentan diferencia significativa para un nivel de significancia del 95%.

Determinación resistencia a la tensión y porcentaje de falla en la madera en tensión

En cuanto a la resistencia a la tensión, los tratamientos 3 y 4 mostraron mayor resistencia, con valores de 45,80 y 44,97 MPa, respectivamente, de forma contraria, la muestra testigo mostró la menor resistencia con un promedio de 14,13 MPa, dicho grupo mostró diferencia significativa con las probetas en condición seca. Por otra parte, los valores de carga máxima aplicada presentan el mismo comportamiento que la resistencia a la tensión.

El Cuadro 7 muestra los valores de carga máxima aplicada en Kg y la resistencia a la tensión en MPa.

Cuadro 7. Carga máxima aplicada en kilogramos (kg), resistencia a la tensión en megapascales (MPa) y porcentaje de falla en la línea de cola de probetas con unión junta de dedos de madera de *C. alliodora* con 2 condiciones de humedad.

Condición	Tratamiento	Carga máxima (kg)	Resistencia a la tensión (MPa)
Seco	1	239,23 ^A (85,38/35,69)	44,57 ^A (15,91/35,69)
	2	179,76 ^B (59,84/33,29)	33,49 ^B (11,15/33,29)
	3	245,80 ^A (74,76/30,41)	45,80 ^A (13,93/30,41)
	4	241,33 ^A (69,39/28,75)	44,97 ^A (12,93/28,75)
Verde	T	75,83 ^C (42,78/56,42)	14,13 ^C (7,97/56,42)

*Valores con letra diferente presentan diferencia significativa para un nivel de significancia del 95%.

** Datos entre paréntesis representan desviación estándar / coeficiente de variación

El Cuadro 8 muestra el porcentaje de probetas de acuerdo al tipo de falla dada, donde el tratamiento de secado al aire 1 obtuvo la mayor cantidad de probetas con falla en estricta en la madera, mientras que las probetas de uniones de junta de dedos procesadas en verde (testigo) obtuvo el mayor porcentaje en falla en la categoría de 70 a 0 % en falla de madera, es decir, la falla principal se da en la línea de cola.

Cuadro 8. Porcentaje de probetas falladas de acuerdo al porcentaje de falla en la madera de probetas con uniones junta de dedos de *C. alliodora* en 2 condiciones de humedad.

Condición	Tratamiento	Porcentaje de falla en la madera		
		100%	99 % - 70%	70 % - 0%
Seco	1	65,4	19,2	15,4
	2	64,0	20,0	16,0
	3	55,3	23,7	21,1
	4	25,0	30,6	44,4
Verde	Testigo	0,0	0,0	100,0

Discusión

Secado al aire

Según la estimación realizada por INDER, 2016, durante el desarrollo del ensayo de secado, el clima se encontraría en época lluviosa, con abundantes lluvias y aumento en la humedad relativa; sin embargo, según las mediciones de las variables climáticas, el tiempo atmosférico se mostró favorable para el ensayo, con poca incidencia de lluvias y altas temperaturas. Actualmente, Costa Rica y el planeta en general vive con momentos de amplia variabilidad climática, la cual puede ser causada por el calentamiento global y la acumulación de gases de efecto invernadero, por lo que la predicción de las condiciones climáticas puede resultar, en algunos casos, inútil (Retana, 2012). Uno de las características principales del secado al aire es la alta dependencia del clima local y de su variabilidad a lo largo del año (Fernández-Golfín y Álvarez, 1998), por lo que, sumado a lo anterior, las condiciones presentadas durante el ensayo resultaron las idóneas para que la madera alcanzara un CH en equilibrio en el menor tiempo, sin embargo, se debe tomar en cuenta que dicho escenario es cambiante, y a lo largo del año pueden surgir condiciones ambientales desfavorables.

El contenido de humedad inicial de los 4 tratamientos del ensayo de secado no se considera homogéneo, ya que posee un coeficiente de variación alto de 36,65 %, la pila tres presenta el menor valor, 98,87%, sin embargo posterior a los 32 días de duración del ensayo esta pila no obtuvo el menor porcentaje de contenido de humedad, fue la pila 1 la que registró el menor contenido de humedad final con 15,42%, y al mismo tiempo la pila tres presentó la menor velocidad de secado con 3,33% de pérdida diaria.

El tiempo de secado, fue en promedio de 28 días, considerado un tiempo de secado rápido según Shupe (2001), lo cual puede ser atribuido a las condiciones ambientales presentadas, espesor de la madera y las características de porosidad y densidad de la madera de laurel, la cual posee una densidad de 0,89 g/cm², considerada baja (Vinuesa, 2003).

El porcentaje de humedad en equilibrio según el entorno del sitio, es ideal para usos como puertas, ventanas, bordes, equipo deportivo, mangos de herramientas, productos de aserraderos y bordes de exteriores, tablas de forro, revestimiento, muebles, para exteriores, madera aserrada para el armazón de una casa, cajas y embalajes (Nutsch, 1996; Shupe, 2001); los cuales coinciden con el uso destinado que la empresa le brinda a la madera *C. alliodora* y a los usos más populares dentro del territorio nacional (Barrantes, A. y Ugalde, S. 2016).

Las curvas de secado presentadas en la Figura 3, muestran una tendencia normal decreciente, donde en los primeros días se da una rápida liberación de agua, lo cual corresponde a la pérdida del “agua libre” que se encuentra en los conductos, vasos, fibras y lúmenes de la madera y es la primera en salir del tronco desde que éste se tumba (Brottons, 2013). Cabe destacar que dentro de las mismas curvas se presentan valores extremos, los cuales se deben a la presencia de lluvias normales de la época (INDER, 2016).

Determinación módulo de ruptura y módulo elástico en flexión

El módulo de ruptura para madera sólida de *C. alliodora* (sin ningún sistema de unión) reportado por Serrano-Montero (2005) es de 30.4 MPa, valor muy cercano a la media estimada del MOR en probetas con unión tipo junta dedo en condición seca que es de 26.21 MPa, lo que indica que la resistencia mecánica disminuye solo un 16% si la madera es recuperada con este tipo de unión. Sanabria y Serrano (1993) aclaran que el aprovechamiento de trozas con diámetros bajos *C. alliodora*, como de árboles cortados en raleos, es factible, en rendimiento de aserrío, por lo que un sistema de unión que genere propiedades similares a la madera sólida provoca que el aprovechamiento de la madera se maximice, tanto ambientales como económicos, así como también en la recuperación de madera dentro de los mismos aserraderos para obtener productos mayor longitud y con una calidad similar.

Los valores de MOR indicados en la Figura 4, muestran como las probetas sometidas al sistema de secado al aire presentan los mayores resultados, en comparación con las probetas en condición húmeda, con diferencia

estadísticamente significativa, dicho valor mejora en casi un 60% si la aplicación del adhesivo y el procesamiento de la unión se da en seco. Serrano-Montero (2005) reporta que la encolabilidad en verde no presenta diferencia en el módulo de ruptura, con una pieza de madera sólida de laurel, brindando similitud en sus propiedades mecánicas; sin embargo, el presente estudio no se comportó de la misma forma, y esto se puede deber al tipo de adhesivo y sistema de unión.

Por el contrario, el comportamiento que presenta el MOE es indiferente al tipo de aplicación, ya que los datos no presentan diferencia significativa, no obstante, los tratamientos de secado al aire tres y cuatro, obtuvieron los valores más elevados de esta propiedad. Las probetas ensayadas presentaron un promedio de 2122,03 MPa de MOE, lo que indica el sistema de unión en cuestión presente un valor elástico muy bajo, caso contrario si a la madera de laurel se le aplica otro sistema de unión como vigas laminadas, el cual, según Serrano-Montero (2005), es de 5400 a 6700 MPa. El sistema de unión del presente proyecto, nos da una pérdida de esta propiedad de un 45% si se compara con una pieza de madera sólida, que posee un MOE de 8453, MPa (Vinueza, 2003). Lo anterior nos demuestra que la recuperación de madera por un sistema de unión junta de dedos a nivel no estructural es una opción prudencial.

Determinación resistencia a la tensión y porcentaje de falla en la madera en tensión

Los valores de resistencia a la tensión en las uniones junta de dedos, mostrados en el cuadro 8, indican que las probetas con aplicación y procesamiento en verde poseen los menores valores, 14.13 MPa promedio, presentando diferencias significativas con las probetas cuyo procesamiento se dio en condición seca. Los tratamientos de secado tres y cuatro obtuvieron las mayores cantidades, con 45.80 y 44.97 MPa respectivamente, las cuales, a su vez, poseen los valores más bajos de contenido de humedad al momento del ensayo, lo anterior coincide con lo dicho por Gil Gil (2013), que el proceso de secado busca obtener estabilidad dimensional y con ello aumenta sus propiedades mecánicas principalmente.

Especies forestales como *Gmelina arborea* y *Pinus radiata*, poseen valores similares a los reportados en el presente estudio, con 46.87 MPa para la primer especie y 38.55 MPa (González, Moya-Roque, Monge, Córdoba, Coto, 2004; Fernández, 2003), lo que indica que la madera de laurel, una especie nativa, puede entrar a competir con dichas especies, las cuales son muy utilizadas en el sector construcción (Barrantes y Ugalde, 2016), sin embargo, se debe tomar en cuenta las diferencias entre las densidades de la madera y sus perfiles de dientes de uniones junta de dedos.

Cuando se realizan sistemas de unión se espera que las fallas que se produzcan sean en su mayoría en la madera y no en la línea de cola, para el presente estudio el mayor porcentaje de falla para las probetas en condición seca, se presentó en 100% madera con valores de hasta 65.4%, y los menores valores en la clasificación de 70% a 0%, siendo un efecto positivo del secado, ya que en la probetas en condición húmeda, presentó un valor del 100% en falla de madera de 0%, es decir la falla se situó en la línea de cola, lo puede deberse al tipo de curado sometido. Misma tendencia se observa en especies como *Gmelina arborea* y *Eucalyptus grandis*, donde la mayoría de las fallas se dan en la madera (González, Moya, Monge, Córdoba, Coto, 2005; Vega, Baño, Pérez, Cardoso, Godoy, O'Neill y Moya, 2017).

Conclusiones

Las curvas de secado para la madera de *C. alliodora* a diferentes espesores, presentaron una tendencia normal. Sin embargo, se detectaron algunas fluctuaciones atribuidas a la época en la que se desarrolló el ensayo.

El tiempo de secado a aire, para la madera de laurel, se considera rápido, ya que es menor a 40 días.

El proceso de secado al aire mejora el módulo de ruptura de las uniones junta dedos en la madera de *C. alliodora* en casi un 60% en comparación con las uniones en condición húmeda.

El módulo de elasticidad obtenido entre condiciones de humedad no presentó diferencias estadísticamente significativas.

La resistencia a la tensión en uniones junta de dedos aumenta considerablemente, en un 50%, si la madera es sometida a un proceso de secado previo.

Las probetas cuyo procesamiento y proceso de encolado en madera verde presentaron falla con menor porcentaje en la madera, es decir, la falla se dio principalmente en la línea de cola.

La unión junta de dedos resulta una buena opción para aprovechamiento de diámetros menores y recuperación de madera de acuerdo a las propiedades mecánicas analizadas en el presente estudio, sobre todo con un secado previo al aire.

Recomendaciones

Definir un proceso de secado al aire dentro del flujo de proceso de la empresa, donde se establezcan factores como dirección del viento, condición del suelo y época climática y la colocación de un área fija para tal fin, con acondicionamiento de un techo para evitar la incidencia de los rayos solares y lluvia.

Procesar las uniones junta de dedos con madera secada previamente y fabricar las uniones con un adhesivo para tal fin.

El uso del adhesivo Poliuretano Multipropósito 3M™ 5010, a pesar de que el fabricante lo recomienda para madera húmeda. Es aconsejable que el valor de humedad de la madera no supere el 30%, ya que, si la madera se encola con valores de humedad superiores la unión no será resistente a esfuerzos mecánicos. Tal y como se evidenció en este trabajo.

Realizar otros ensayos donde se evalúe la calidad y resistencia de otros adhesivos.

Referencias

- Abarca-Guerrero, L., y Leandro-Hernández, A. G. (2017). Situación actual de la gestión de los materiales de construcción en costa rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 29(4), 111-122.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, USA). (2003). D-1442-92. Standard test methods for direct moisture content measurements of wood and wood-base materials. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, USA, ASTM. 04(10), 1-6.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, USA). (2005). D-5572-92. Standard Specification for Adhesives Used for Finger Joints in Nonstructural Lumber Products. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, USA, ASTM. 04(10), 1-17.
- Barrantes, A. y Ugalde, S. (2013). *Usos y aportes de la madera en Costa Rica: Estadísticas 2012*. Oficina Nacional Forestal.
- Barrantes, A. y Ugalde, S. (2016). *Usos y aportes de la madera en Costa Rica. Estadísticas 2015*. Oficina Nacional Forestal.
- Brotóns, P. (2013). *Construcción de estructuras de madera*. Editorial Club Universitario.
- Cordero, J., y Boshier, D. H. (Eds.). (2003). *Árboles de Centroamérica: un manual para extensionistas*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Coto, A. (2015). *Manual de uso de la madera para la construcción*. Oficina Nacional Forestal (ONF), Fondo de financiamiento forestal (FONAFIFO).
- Fernández, M. (2003). Estudio del efecto de la inclinación de la fibra en la resistencia a la tracción de uniones dentadas en pino radiata. Universidad Austral de Chile.
- Fernandez-Golfín, J., Álvarez, H. (1998). *Manual de secado de maderas*.

- Gil Gil, J. (2013). Caracterización del proceso de secado de madera para uso industrial (Bachelor's thesis, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira).
- González, G., Moya-Roque, R., Monge, F., Córdoba, R., y Coto, J. C. (2004). Evaluating the strength of finger-jointed lumber of *Gmelina arborea* in Costa Rica. *New forests*, 28(2-3), 319-323.
- Instituto Nacional de Desarrollo Rural (INDER). (2016). *Caracterización del territorio Cartago- Oreamuno- El Guarco- La Unión. Región Central*.
- Jokerst, R. W. (1981). *Finger-Jointed Wood Products* (Research Report No. FSRP-FPL-382). Forest Products Lab Madison Wi.
- JUNAC (Junta de Acuerdo de Cartagena). (1989). *Manual del grupo Andino para el secado de maderas*. Junta de Acuerdo de Cartagena .130 p.
- Moya-Roque, R., y Gonzáles-Trejos, G. (2006). Las vigas laminadas estructurales: aspectos a considerar para su fabricación en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 3(8), 70-76.
- Muñoz, F. (2006). Uso de tabla psicométrica en la industria de la madera. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 3(7), 75-81.
- Muñoz, F. (2008). Secado de la madera aserrada. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, (5) 13, 1-6.
- Nutsch, W. (1996). *Tecnología de la madera y del mueble*. Reverté.
- Piao, C., y Shupe, T. F. (2016). Mechanical properties of finger-jointed wood from composite utility poles made of small diameter timber. *Drvna Industrija*, 67(1), 73-78. doi:10.5552/drind.2016.1436
- Retana, J. (2012). Eventos hidrometeorológicos extremos lluviosos en Costa Rica desde la perspectiva de la adaptación al cambio en el clima. *Revista de Ciencias Ambientales*, 44(2), 5-16.
- Rietz, R., y Page, R. (1972). *Air drying of lumber: A guide to industry practice*. Agri. Handb.

- Rojas, O. (1985). *Estudio agroclimático de Costa Rica*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Sanabria, J. y Serrano, R. (1993). Rendimiento en aserrío y posibilidades de uso industrial de las trozas del primer raleo de una plantación de laurel (*Cordia alliodora* Ruiz & Pavón Oken). *Revista Tecnología en Marcha*. (12(2), 37-42.
- Serrano-Montero, J. R. (2005). Influencia del apartamiento de la zona juvenil y el encolado en verde sobre la calidad de la madera de cuatro especies forestales de plantación. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 2(4), 22-34.
- Shupe, T.F. 2001. *Procesos de secado para evitar defectos en la Madera verde*. Pub. No. 2642. LSU AgCenter.
- Tsoumis, G. (1991). *Science and technology of wood: structure, properties, utilization* (Vol. 115). New York: Van Nostrand Reinhold.
- Vega, A., Baño, V., Gomar, C. P., Cardoso, A., Godoy, D., O'Neill, H., & Moya, L. (2017, mayo). Evaluación de la resistencia de uniones dentadas finger-joint con madera de *Eucalyptus grandis* de procedencia uruguaya. Documento presentado en la conferencia Congreso latinoamericano de Estructuras de Madera y Congreso Iberoamericano de la madera en la construcción (CLEM-CIMAD), Buenos Aires, Argentina.
- Vinueza, M. (2003). Ficha Técnica No. 8, laurel. Ecuador Forestal