

Esfuerzos admisibles de *diseño por grado estructural* para
nueve maderas de plantación de *Costa Rica*

Roger Moya-Roque¹
Guillermo González Beltrán²

Resumen

Costa Rica cuenta con madera de varias especies proveniente de plantaciones forestales para abastecer la demanda de madera. Sin embargo, no se tienen los valores de esfuerzos admisibles para grados estructurales de estas maderas. El presente trabajo tiene como objetivo, mostrar los valores de diseño derivados de madera libre de defectos para nueve especies de plantación utilizadas en la reforestación comercial. Los esfuerzos analizados fueron flexión estática, compresión paralela y perpendicular al grano y cortante y tensión paralela al grano. Los resultados en la madera libre de defectos mostró que *Tectona grandis*, *Terminalia oblonga* y *Acacia mangium* presentaron los más altos valores en MOE y MOR en flexión. En compresión paralela y perpendicular, *T. grandis* presentó la más alta resistencia, *A. mangium* y *T. grandis* fueron las especies con la mayor resistencia en tensión paralela al grano. *A. mangium* y

Abstract

Allowable stress design by structural grade for nine plantation woods of Costa Rica

Costa Rica has several species wood from forest plantations to supply the demand for end-user wood. However, this country does not have allowable stress design for different structural grade for these woods. This paper aims to show the allowable stress design values derived from clear wood for nine of plantation species used in commercial reforestation in Costa Rica. The mechanical properties analyzed were: static bending, compression parallel and perpendicular to grain and shear and tension parallel to grain. The results in clear wood specimens showed that *Tectona grandis*, *Terminalia oblonga* and *Acacia mangium* presented the highest values of MOE and MOR in static bending. In compression parallel and perpendicular, *T. grandis* showed the highest resistance. *A. mangium* and *T. grandis* were the plantation species

1. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal; Cartago, Costa Rica; moya@itcr.ac.cr +(506) 2550-9092

2. Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales; San José, Costa Rica; guillermo.gonzalez@ucr.ac.cr +(506) 2511-2509

Cupressus lusitanica mostraron los más altos valores en cortante paralela al grano. *Vochysia guatemalensis* y *Bombacopsis quinata* mostraron la resistencia más baja en todas las propiedades medidas. La derivación de los esfuerzos de diseño permitió establecer tres grupos de especies. El grupo 1 está formado por *Acacia mangium*, *T. grandis*, *Terminalia amazonia* y *T. oblonga* con los más altos valores admisibles. El grupo 2, con valores intermedios de valores admisibles, lo componen *Gmelina arborea* y *C. lusitanica*. El grupo 3, con los valores admisibles más bajos, compuesto por *Alnus acuminata*, *B. quinata* y *V. guatemalensis*.

Palabras clave: Maderas tropicales, plantaciones, crecimiento rápido, grados estructurales, resistencia de la madera, Costa Rica.

Introducción

La reforestación en Costa Rica surgió como resultado de la implementación de un sistema de incentivos por parte del Estado (Castro *et al.* 1998), con el objetivo de atenuar el proceso de pérdida de la cobertura boscosa sufrida en las décadas de los 60s y 70s del siglo pasado (Sader y Joyce 1988). En este proceso de reforestación se han plantado una gran variedad de especies, tales como melina (*Gmelina arborea*), teca (*Tectona grandis*) y acacia (*Acacia mangium*) entre las especies exóticas y laurel (*Cordia alliodora*), amarillón (*Terminalia amozonia*), surá (*Terminalia oblonga*), cebo (*Vochysia guatemalensis*), pochote (*Bombacopsis quinata*) y jaúl (*Alnus acuminata*), entre las nativas (Murillo *et al.* 2001, Pérez y Kanninen 2001, Petit y Montagnini 2004, Moya 2004).

Uno de los inconvenientes que presenta el mercado actual de madera de estas especies es que la madera aserrada se ha dedicado principalmente a la fabricación de tarimas (Barrantes y Ugalde 2012), aunque algunas de ellas, como melina y teca, en la actualidad son utilizadas en una gran variedad de productos (Moya 2004, Moya y Pérez 2007). En las otras especies, no se han dado los resultados esperados debido a que no se cuenta con una disponibilidad que permita establecer un mercado estable, a la falta de disponibilidad de materia prima y a la carencia de conocimientos sobre las propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de estas maderas (Moya y Muñoz 2010, Moya *et al.* 2010).

Así mismo, existe un gran interés del sector forestal productivo privado de Costa Rica por conocer las propiedades de las especies con potencial para la reforestación comercial, dadas las necesidades urgentes de certificar los posibles usos y aplicaciones de este tipo de madera (Tuk 2010). El sector construcción por su

with the highest strength in tension parallel to the grain. *A. mangium* and *Cupressus lusitanica* presented the highest values in shear parallel to grain. *V. guatemalensis* and *Bombacopsis quinata* showed lower resistance in all measured mechanical properties analyzed. The derivation of allowable stress design was possible to establish three groups of species. Group 1 is composed of *A. mangium*, *T. grandis*, *T. amazonia* and *T. oblonga*, with the highest allowable stress design. Group 2, with intermediate allowable stress design values, component species *Gmelina arborea* and *C. lusitanica*. Group 3 species, with lower allowable values, is grouped of *Alnus acuminata*, *B. quinata* and *V. guatemalensis*.

Key words: Tropical wood, plantations, fast-growth, structural grade, wood resistance, Costa Rica.

parte, a pesar de ser el principal consumidor de madera aserrada en Costa Rica, está sufriendo un proceso acelerado de sustitución por materiales metálicos, plásticos y los derivados del concreto (Serrano 2006). Uno de los inconvenientes señalados al uso de la madera en la construcción, es que no se cuenta con esfuerzos admisibles de diseño para especies de plantación ni con una estandarización o clasificación de la madera usada en este ramo (Serrano y Moya 2013, Tuk 2010).

Los esfuerzos admisibles para diseño son valores de resistencia mecánica que se obtienen para los materiales y que se derivan de pruebas experimentales. En el caso de la madera, a diferencia de otros materiales, debido a su naturaleza ortotrópica y su gran variabilidad natural, los valores promedio deben reducirse por varios factores tales como defectos, variabilidad natural, contenido de humedad, tipo de esfuerzo, entre otros. Estos valores son importantes, ya que el profesional estructural requiere para sus cálculos, información confiable para proyectar las dimensiones de los elementos y las conexiones que componen la estructura tales como vigas, columnas y armaduras (Tuk 2010).

Los esfuerzos admisibles de diseño derivados para la madera de plantación de Costa Rica se obtienen mediante el siguiente procedimiento (INTECO 2010): (i) muestreo y selección de los árboles, (ii) preparación y ejecución de los ensayos mecánicos según la norma ASTM D 143-94 (ASTM 2003a) (iii) obtención del promedio y la desviación estándar de cada propiedad, (iv) cálculo del esfuerzo de referencia (corresponde con el quinto percentil), (v) ajuste del esfuerzo de referencia por grado estructural, de acuerdo con la razón de resistencia definida para cada grado, (vi) ajuste por duración de la carga y factor de seguridad y (vii) ajuste por secado.

En Costa Rica se cuenta con poca información de los esfuerzos admisibles de diseño para madera.

Recientemente, Tuk (2010) publicó los valores de esfuerzos admisibles de diseño de 16 especies de madera proveniente del bosque natural, a pesar de que dicha información está disponible desde 1983 como parte de un proyecto de investigación del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Así mismo, es poco conocido por los profesionales estructurales que el grupo de países Andinos (Colombia, Perú, Bolivia, Ecuador y Venezuela) cuenta con valores de esfuerzos admisibles de diseño para maderas tropicales en tres categorías de densidades (Keenan y Tejada 1987) y los mismos se pueden aplicar a las maderas de bosque natural de Costa Rica.

Ante la carencia de esfuerzos admisibles de diseño para madera proveniente de plantaciones forestales es que el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar los valores de esfuerzos admisibles de nueve principales especies (melina, teca, acacia, laurel, amarillón, jaúl, surá, cebo y pochote) utilizadas en la reforestación comercial de Costa Rica. Los esfuerzos admisibles son calculados para flexión estática, compresión y cortante.

Materiales y métodos

Plantaciones utilizadas y muestreo

Las plantaciones muestreadas presentaron edades entre 9 y 13 años, densidades entre 338 a 575 árboles/ha y diferentes intensidades de manejo, los cuales se detallan en el Cuadro 1. En todas las plantaciones, el espaciamiento inicial fue de 3 x 3 m, y una densidad inicial de 1 111 árboles/ha. En todos los casos se obtuvo madera del segundo raleo de cada plantación, ya que a estas edades, la mayoría de las especies plantadas presentan el potencial de utilizar la madera para uso estructural.

En la selección de los árboles a muestrear se siguió la metodología propuesta por Moya *et al.* (2002) que consiste en establecer dos parcelas temporales, distribuidas en un área de aproximadamente 1 hectárea representativa de toda la plantación. En ella fueron tomados los datos de diámetro a 1,30 m de altura del suelo, altura total de los árboles y altura de inicio de la copa. Posteriormente, con los datos de diámetro, se confeccionó la distribución de frecuencia acumulada de los diámetros presentes en la plantación muestreada y se dividió en tres partes correspondientes a los terciles de la distribución. Tres categorías de dominancia respecto al diámetro fueron establecidas: grueso, medio y delgado. En cada categoría se seleccionaron tres árboles al azar, dando como resultado nueve árboles por cada plantación. Se tuvo el cuidado de que los árboles fueran rectos, sin bifurcaciones y sin daños visibles. Para cada uno de los árboles seleccionados se cortó una troza entre la base y 2,5 m de altura. Además, a esta altura también se cortó un disco de aproximadamente 3,0 cm de espesor para la determinación del peso específico básico (PEB).

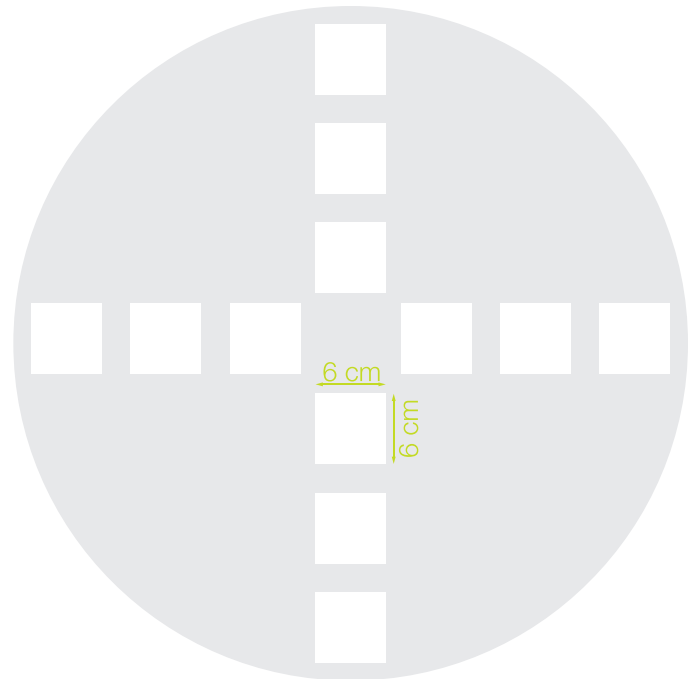


Figura 1. Esquema de corte utilizado en la obtención de las muestras para las propiedades mecánicas de la madera. Fuente: ASTM D-5536-94 (ASTM 2003b).

Muestreo dentro del árbol

Las propiedades mecánicas fueron evaluadas a partir de madera libre de defectos de las trozas obtenidas, a las cuales se les aplicó el patrón de corte establecido en la norma ASTM D 5536 (ASTM 2003b). Para ello, en la parte central del árbol se cortaron bloques de tipo cruciforme con dimensiones de 6 cm x 6 cm de sección transversal, para luego obtener piezas de 5 cm x 5 cm o bien piezas de 2,5 cm x 2,5 cm (Figura 1).

Condición de humedad evaluada

El material extraído por el muestreo (Figura 1), fue colocado en condiciones de temperatura de 22 °C y 66% de humedad relativa, lo que permitió alcanzar un contenido de humedad de equilibrio de 12%, denominado como seco al aire. Los ensayos de resistencia, por lo tanto, fueron realizados en esa condición.

Propiedades mecánicas evaluadas

Las propiedades mecánicas determinadas fueron las siguientes: flexión estática (F_b) que da como resultado el módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (E), esfuerzo en compresión paralela al grano (F_o), esfuerzo en compresión perpendicular al grano (F_c), esfuerzo en cortante paralelo al grano (F_v), esfuerzo en tensión paralela al grano (F_t) y. Estas propiedades se determinaron según la norma ASTM D 143 (ASTM 2003a). Los especímenes que se utilizan están libres de defectos y sus dimensiones se establecen de acuerdo con la norma indicada anteriormente. De cada troza se

Cuadro 1. Condiciones y manejo aplicado a las plantaciones muestreadas de las 10 especies maderables de plantaciones forestales de Costa Rica.

Especie	Edad (años)	Densidad de plantación (árboles/hectárea)	Altura total (m)	Diámetro altura de pecho (cm)	Manejo
<i>Acacia mangium</i>	9	556	17,1	20,5	A la edad de 4 años fue aplicado un raleo del 50% de los árboles existentes.
<i>Alnus acuminata</i>	9	338	19,0	26,7	Se aplicaron limpiezas anuales de la vegetación arbustiva y a las edades de 3 y 6 años se ejecutaron raleos de mantenimiento.
<i>Bombacopsis quinata</i>	15	240	24,5	31,3	Fue aplicado un raleo sanitario y 1 raleo del 50% a la edad de 7 años
<i>Cupressus lusitanica</i>	18	408	19,24	28,02	Se aplicaron limpiezas anuales de la vegetación arbustiva y a las edades de 6 y 10 años se ejecutaron raleos de mantenimiento.
<i>Gmelina arborea</i>	12	320	20,4	26,12	Raleo sanitario y un raleo de 50% a la edad de 4 y 8 años
<i>Tectona grandis</i>	13	475	21,85	30,2	Recibieron las primeras prácticas de mantenimiento (raleos y podas) a la edad de 6 años.
<i>Terminalia amazonia</i>	14	452	21,40	22,59	Fue aplicado un raleo sanitario y 2 raleo del 50% a la edad de 5 y 9 años.
<i>Terminalia oblonga</i>	10	495-575	20,70	18,50	Fue aplicado un raleo sanitario y 1 raleo del 50% a la edad de 8 años.
<i>Vochysia guatemalensis</i>	8	515	22,7	18,5	A la edad de 4 años fue aplicado un raleo del 50% de los árboles existentes.

obtienen un total de 4 muestras por tipo de ensayo para un total de 36 especímenes ensayados.

Para la determinación del peso específico básico (PEB) se utiliza el disco obtenido a una altura de 2,5 m. Del disco se cortan dos secciones para eliminar la médula y la medición se realiza sobre ambas. El peso específico básico fue determinado según la norma ASTM D 2395 (ASTM 2003c).

Derivación de los esfuerzos admisibles de diseño

Los esfuerzos admisibles de diseño fueron calculados para cada especie y para tres grados estructurales, denominados como grado 1, grado 2 y grado 3. El grado 1 representan la madera estructural de mayor resistencia para la especie, el grado 3 la madera estructural de menor resistencia y el grado 2, la madera estructural de resistencia intermedia entre el grado 1 y 3.

La derivación de los esfuerzos admisibles se basó en lo indicado en la norma ASTM D 245 (ASTM 2003d): (i) se calculan el promedio y la desviación estándar de los ensayos de resistencia realizados, (ii) se obtiene el esfuerzo de referencia que corresponde a la exclusión del quinto percentil, (iii) se ajusta el esfuerzo de referencia por grado estructural de acuerdo con la razón de resistencia definida para cada grado (Cuadro 2), (iv) se aplica un ajuste por duración de la carga y factor de seguridad (Cuadro 2), (v) se aplica un factor de ajuste por secado.

Este factor se debe a que los ensayos se realizaron con una condición del 12% de contenido de humedad, y estos deben reportarse para un contenido de humedad de 19%. (vi) Finalmente, se debe aplicar un factor de tamaño C_F al esfuerzo admisible de flexión (F_b) que depende de la altura d de la sección que se vaya a emplear:

$$C_F = \left(\frac{50}{d} \right)^{1/9}$$

En la ecuación anterior, d debe estar en mm. El número 50 aparece debido a que los ensayos de flexión se realizan a especímenes de 50 mm de altura.

Análisis estadísticos

La normalidad y la presencia de valores atípicos fueron verificadas para cada propiedad mecánica en la madera libre de defectos. Posteriormente se aplicó un análisis de la varianza (ANOVA) en propiedades mecánicas, donde la variable independiente correspondió a la especie y como variable de respuesta las propiedades analizadas. Finalmente para encontrar diferencias estadísticas entre las medias se aplicó la prueba de Tukey, al 1,0% de significación.

Cuadro 2. Razón de resistencia aplicada para los diferentes grados estructurales expresado en porcentaje de resistencia y factores adicionales de ajuste.

Propiedad	Grados estructurales			Factor por duración de carga y factor de seguridad	Ajuste por secado
	Grado 1	Grado 2	Grado 3		
Flexión (Fb)	70	55	40	1/2,1	0,86
Módulo de elasticidad (E)	100	90	80	1/0,94	0,97
Compresión paralela al grano (Fc)	70	55	40	1/1,9	0,67
Compresión Perpendicular al grano (Fc \perp)	100	100	100	1/1,67	0,7
Cortante paralelo al grano (Fv)	50	50	50	1/2,1	0,97
Tensión paralela al grano (Ft)	40	30	20	1/2,1	0,84

Resultados y discusión

Valores de resistencia en madera libre de defectos

Los promedios de las propiedades mecánicas ejecutadas para derivar los esfuerzos admisibles de diseño son mostrados en el Cuadro 3. Las propiedades de *T. grandis*, *A. mangium*, las dos especies de *Terminalia* y *C. lusitanica* presentaron valores de resistencia más altos en algunas propiedades en relación a las otras especies. En tanto que, *V. guatemalensis* y *B. quinata* obtuvieron los valores más bajos de las propiedades medidas.

Un aspecto importante a destacar en los valores de resistencia encontrados, es la relación de entre estos y los valores de PEB. Por ejemplo, *V. guatemalensis* y *B. quinata*, con los valores de PEB más bajos, de 0,36 y 0,35 respectivamente, son las especies de más baja resistencia en todas las propiedades. En tanto que las especies con altos valores de PEB, presentaron en general alta resistencia mecánica. Pero se evidencia un patrón confuso entre las especies de valores altos de PEB, *A. mangium*, *C. lusitanica*, *T. oblonga* y *T. amazonia*. Por ejemplo, *T. amazonia* presenta un PEB similar que *A. mangium* (0,58 y 0,57 respectivamente), *T. amazonia* promedió 17,9 MPa en la resistencia a la compresión paralela a la fibra, mientras que en la especie *A. mangium* en esa misma propiedad presentó un valor significativamente mayor, 34,0 MPa (Cuadro 3).

Estudios previos sobre los valores de resistencia de algunas de las especies estudiadas muestran valores de resistencia mayor a las encontradas en el presente estudio (Llach 1971, González *et al.* 1973, Keenan y Tejada 1987, Shupe *et al.* 2005). Esta diferencia en la resistencia mecánica es atribuida a las diferentes condiciones de crecimiento, específicamente si los árboles se desarrollan o no en plantaciones forestales. Los árboles creciendo en condiciones de plantaciones producen madera con menor PEB y por tanto propiedades de resistencia inferior (Zobel y Sprague 1998). Por ejemplo, árboles de *T. amazonia* creciendo en bosques naturales de Panamá (Llach 1971), Nicaragua (González *et al.* 1973), Honduras (Shupe *et al.* 2005), Bolivia, Venezuela y Colombia (Keenan y Tejada 1987) reportan propiedades mecánicas superiores a las

encontradas en los árboles estudiados que provienen de plantaciones forestales. En el caso de *V. guatemalensis*, los árboles creciendo en bosques naturales en La Ceiba (Honduras), Panamá (Llach 1971), Nicaragua (González *et al.* 1973), Honduras (Shupe *et al.* 2005), y Costa Rica (Tuk 1980) demostraron resistencia más altas en las propiedades mecánicas que los reportadas por Sotela y Carpio (1991) y el presente estudio.

Aunque fue encontrado en este estudio que los árboles de plantaciones presentaron una resistencia más baja que aquellos árboles creciendo en los bosques naturales, algunas propiedades como el PEB, incrementó con la edad de los árboles (Zobel y Sprague 1998). Estos comportamientos son atribuidos a que muchos cambios moleculares y fisiológicos ocurren en el cambio vascular durante el envejecimiento (Plomion *et al.* 2001). Por ejemplo, durante la etapa adulta, la pared celular de las fibras es más gruesa que la pared de las fibras producidas en la etapa juvenil (Horacek *et al.* 1999), por lo que es de esperar que los valores de resistencia de las especies estudiadas aumenten en árboles cosechados en el tercer raleo o cosecha final de las plantaciones y por tanto los valores de esfuerzos admisibles de diseño pueden variar en esas edades.

Esfuerzos admisibles de diseño

La derivación de los esfuerzos admisibles de diseño de las diferentes propiedades de las especies de plantación estudiadas se presentan en el Cuadro 4. Dichos valores son derivados según la aplicación de varios ajustes tal y como se describió anteriormente (ver anexo 1). En el Cuadro 3 se presentan los valores para los tres grados estructurales propuestos (grado 1, 2 y 3), en donde la resistencia disminuye con el aumento en el número de grado estructural, o sea, el grado estructural 1 presenta mayor resistencia que el grado estructural 3.

Al comparar los resultados de valores de esfuerzos admisibles de diseño con los valores admisibles de otras especies de madera de Costa Rica, pero proveniente de árboles creciendo en el bosque natural (Tuk 2010), se tiene que en el caso de la madera de *Alnus acuminata* y *Vochysia guatemalensis*, proveniente de árboles

Cuadro 3. Promedio de propiedades mecánicas en madera libre de defectos para nueve especies de plantación (a 12% de CH).

Propiedad mecánica	<i>Acacia mangium</i>	<i>Alnus acuminata</i>	<i>Bombapcosis quinata</i>	<i>Cupressus lusitanica</i>	<i>Gmelina arborea</i>	<i>Tectona grandis</i>	<i>Terminalia amazonia</i>	<i>Terminalia oblonga</i>	<i>Vochysia guatemalensis</i>	
Peso específico básico	0,57	0,39	0,35	0,54	0,45	0,58	0,58	0,61	0,36	
Flexión estática (MPa)	MOR	78,4 ^{ab} (1,22)	51,9 ^c (1,93)	35,8 ^d (2,01)	57,6 ^c (1,85)	95,1 ^a (8,17)	50,3 ^c (0,87)	74,6 ^b (1,58)	82,3 ^{ab} (0,88)	40,4 ^d (1,03)
	MOE	12310 ^a (1010)	7700 ^c (2310)	5600 ^e (1990)	7057 ^c (2720)	13100 ^a (1120)	8300 ^c (1490)	11910 ^a (904)	8068 ^b (1372)	6410 ^d (1070)
Compresión (MPa)	//	34 ^{bc} (3,37)	29 ^c (1,44)	8,7 ^f (2,29)	14,3 ^e (1,56)	42,5 ^a (4,51)	31,8 ^b (5,86)	17,9 ^d (1,20)	37,5 ^b (0,84)	21,3 ^d (1,31)
	⊥	24 ^c (2,52)	15,6 ^d (1,80)	10,7 ^e (2,40)	24,1 ^c (1,65)	39,6 ^a (1,05)	-	22,3 ^c (2,23)	35,3 ^b (1,16)	14,5 ^d (1,58)
Cortante paralela al grano (MPa)	9,6 ^a (1,5)	7,9 ^b (2,13)	4,7 ^d (1,71)	9,4 ^a (1,54)	6,3 ^c (1,00)	6,2 ^c (1,05)	7,5 ^b (2,57)	7,6 ^b (0,78)	6,3 ^c (1,64)	
Tensión paralela al grano (MPa)	89,7 ^a (2,08)	67,7 ^{bc} (2,44)	43,0 ^d (3,29)	52,2 ^{cd} (3,87)	47,0 ^d (8,00)	91,2 ^a (20,1)	56,7 ^{bcd} (2,72)	65,1 ^{bc} (2,85)	39,4 ^d (2,77)	

Leyenda: // = paralelo al grano, ⊥ = perpendicular al grano.

Nota: Los valores entre paréntesis representa la desviación estándar y letras diferentes entre especies en una misma propiedad son estadísticamente diferentes en un nivel de confianza de 99%.

creciendo en bosques naturales, se reportan valores de esfuerzos admisibles de diseño ligeramente mayor o similar que los que presenta la madera de los árboles creciendo en condiciones de plantaciones forestales, que es el caso de este estudio. Por ejemplo, en el valor de módulo de elasticidad (E) encontrado en la madera de plantaciones de *Alnus acuminata* de este estudio es de 7500 MPa en el grado estructural 1, mientras que la madera de esa especie pero proveniente de bosque natural, el valor del esfuerzo admisible de diseño reportado es 11 500 MPa. En tanto que la madera de *Vochysia guatemalensis* de bosque natural presenta un esfuerzo en flexión (F_b) de 9,5 MPa en el grado estructural 1, pero en plantaciones, para este mismo grado estructural 1, presenta un valor de 11,4 MPa.

En el estudio llevado a cabo por Tuk (2010) se establecieron las siguientes categorías: especies duras, semiduras, suaves y muy suaves. Al considerar esta misma clasificación se tiene que ninguna de las especies de plantación estudiada presenta valores comparables al grupo de las especies duras. En tanto que *T. grandis*, *A. mangium*, *T. amazonia* y *T. oblonga* presenta valores de esfuerzos admisibles de diseño comparables con el grupo de especies de madera semiduras. Las especies como *G. arborea* y *C. lusitanica*, presentaron valores admisibles similares a las especies suaves y finalmente *V. guatemalensis*, *A. acuminata* y *B. quinata* presentaron valores de resistencia similares a las especies catalogadas como muy suaves.

Basados en los resultados anteriores, se puede establecer una separación en tres grupos de diferentes especies para las maderas de plantación de Costa Rica. En un primer grupo se ubican las especies con los

valores más altos de esfuerzos admisibles de diseño en las diferentes propiedades y lo componen *A. mangium*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga*. El segundo grupo, con valores intermedios de valores admisibles, lo componen las especies *G. arborea* y *C. lusitanica*. Finalmente, el grupo de especies con los valores admisibles más bajos es compuesto por *A. acuminata*, *B. quinata* y *V. guatemalensis* (Cuadro 4).

Al comparar esta posible separación de grupos de especies con otras maderas de diferentes latitudes, por ejemplo, la clasificación de la Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC), que trabajó varios grupos de especies del sector Andino de América del Sur (Keenan y Tejada 1987), se tiene que las especies de plantación de Costa Rica con mayores esfuerzos admisibles de diseño (*A. mangium*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga*), presentaron valores de esfuerzos admisibles similares al grupo estructural B de la JUNAC. Situación que es de esperar porque la JUNAC ubica en ese grupo a especies con PEB de 0,56 a 0,70 y las especies de plantación de *A. mangium*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga* presentan un PEB dentro de ese rango (Cuadro 4). Asimismo, el grupo intermedio en este estudio, compuesto por *G. arborea* y *C. lusitanica*, es comparable con el grupo estructural C, que incluye todas las especies con valores de PEB entre 0,40 a 0,55, rango que contempla los valores encontrados en las anteriores dos especies (Cuadro 4). Finalmente, la JUNAC no estima esfuerzos admisibles de diseño para especies con PEB menor de 0,40. Sin embargo, en el estudio de las maderas de plantaciones de Costa Rica, existen tres especies (*A. acuminata*, *B. quinata* y *V. guatemalensis*) en las que los esfuerzos admisibles llegan a alcanzar los valores de la menor categoría del grupo estructural

Cuadro 4. Esfuerzos admisibles de diseño para nueve especies de plantación de Costa Rica secada a 12% de contenido de humedad.

Especie	Esfuerzos admisibles para cada grado estructural(MPa)							Peso específico Básico
	Fb	E	E _{min}	Fc	Fc _⊥	Fv	Ft	
<i>Acacia (Acacia mangium)</i>								
Grado 1	17,2	12000	10000	6,7	1,34	11,34	11,20	0,57
Grado 2	13,4	9000	10500	5,2	1,34	8,4	11,94	
Grado 3	9,8	8000	9500	3,8	1,34	5,6	11,94	
<i>Jaúl (Alnusacuminata)</i>								
Grado 1	11,4	7500	3500	5,7	7,52	0,78	8,4	0,39
Grado 2	9,0	6500	3000	4,5	7,52	0,78	6,3	
Grado 3	6,5	6000	2500	3,2	7,52	0,78	4,2	
<i>Pochote (Bombapcosis quinata)</i>								
Grado 1	7,8	2000	5500	1,0	0,34	5,4	3,64	0,35
Grado 2	6,2	2000	5000	0,8	0,34	4,0	3,64	
Grado 3	4,5	1500	4500	0,6	0,34	2,7	3,64	
<i>Ciprés (Cupressus lusitanica)</i>								
Grado 1	12,6	2500	7500	2,7	1,30	6,5	12,18	0,54
Grado 2	9,8	2500	6500	2,1	1,30	4,9	12,18	
Grado 3	7,2	2000	6000	1,6	1,30	3,3	12,18	
<i>Melina (Gmelina arborea)</i>								
Grado 1	11,0	8000	5000	4,8	-	0,88	4,7	0,45
Grado 2	8,6	7000	4500	3,7	-	0,88	3,5	
Grado 3	6,3	6500	4000	2,7	-	0,88	2,3	
<i>Teca (Tectona grandis)</i>								
Grado 1	20,8	10500	12500	8,0	0,84	7,8	4,72	0,58
Grado 2	16,4	9500	11500	6,2	0,84	5,8	4,72	
Grado 3	11,8	8500	10000	4,5	0,84	3,9	4,72	
<i>Roble coral (Terminalia amazonia)</i>								
Grado 1	16,4	11500	9500	3,5	0,16	7,0	-	0,54
Grado 2	12,8	10500	8500	2,8	0,16	5,3	-	
Grado 3	9,4	9000	7500	2,0	0,16	3,5	-	
<i>Amarillon (Terminalia oblonga)</i>								
Grado 1	18,0	8000	5500	7,4	1,28	8,2	17,84	0,61
Grado 2	14,2	7000	4500	5,8	1,28	6,1	17,84	
Grado 3	10,2	6000	4000	4,2	1,28	4,1	17,84	
<i>Chancho blanco (Vochysia guatemalensis)</i>								
Grado 1	8,8	6000	4000	4,2	0,64	4,9	7,12	0,36
Grado 2	7,0	5500	4000	3,3	0,64	3,7	7,12	
Grado 3	5,0	5000	3500	2,4	0,64	2,5	-	

Donde: Fb: Esfuerzo en flexión, E: Módulo de elasticidad, E_{min}: Módulo de elasticidad mínimo, Fc: Esfuerzo en compresión paralela, Fc_⊥: Esfuerzo en compresión perpendicular al grano, Fv: Esfuerzo en cortante, Ft: Esfuerzo en tensión paralela al grano.

Nota:

1. los valores de este cuadro se derivan para ser utilizados con la metodología de diseño presentada en la especificación "National Design Specification for Wood Construction ASD/LRFD"
2. El peso específico básico corresponde a la relación del peso seco al horno y el volumen en estado verde.

C de la JUNAC. Además, en ninguna de las especies estudiadas se encontró valores de esfuerzo admisibles de diseño próximos al grupo estructural A de la JUNAC (con especies que presenten valores de PEB de 0,71 a 0,90), debido a que ninguna de las especies presenta valores de PEB superior a 0,61 (Cuadro 4).

Conclusiones

Laderivación de los esfuerzos de diseño para las principales especies de plantación utilizadas en la reforestación comercial de Costa Rica, permitió establecer tres grupos de especies. El grupo 1 lo componen las especies *A. mangium*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga* con los valores más altos de esfuerzos admisibles de diseño en las diferentes propiedades. El grupo 2, con valores intermedios de valores admisibles, lo componen *G. arborea* y *C. lusitanica*. Finalmente, el grupo 3 presentaron los valores admisibles más bajos y estaba compuesto por *A. acuminata*, *B. quinata* y *V. guatemalensis*.

Esta información permite disponer de valores de diseño confiable para los diseños estructurales correspondientes, pero también obliga a que los productores entrenen a su personal para que realicen una clasificación visual acertada.

Agradecimientos

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica por el apoyo financiero al Proyecto de Investigación.

Referencias

- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). 2003a. D 143-94. Standard test methods for small clear specimens of timber. In Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 04.10. 31 p.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). 2003b. D5536-94. Standard practice for sampling forest trees for determination of clear wood Properties. In Annual Book of ASTM standards. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06. 9 p. (ASTM D 5536-94 Repeared 2004).
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). 2003c. D 2395-02 Standard test methods for specific gravity of wood and wood-base materials. In Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 04.10. 7 p.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). 2003d. D 2555-02 Standard test methods for establishing clear wood strength values. In Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 04.10. 16 p.
- Barrantes, A., Ugalde S. 2012. Usos y aportes de la madera en Costa Rica. Estadísticas 2011. San José, CR, Oficina Nacional Forestal. p.9
- Castro, R., Tattembach F., Arias G. 1998. Costa Rica: hacia la sostenibilidad de sus recursos naturales. San José, CR, Fondo Nacional de Financiamiento Forestal. pp. 6-7
- González, G., Wiessel C., Chavarria G. 1973. Propiedades y usos de quince especies maderables del nordeste de Nicaragua. Managua, NI, Programa de las Naciones Unidas FO: SF/NIC 9. p. 166 (Informe Técnico n°9).
- INTECO (Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica). 2010. Madera estructural - Clasificación en grados estructurales para la madera aserrada mediante una evaluación visual. San José, CR, INTECO. p. 7-11
- Horacek, P., Slezingerova J., Gandelova L. 1999. Effect of environment on the xylogenesis of Norway spruce (*Picea abies* [L.]Karst.). In Wimmer, R., Vetter R.E., (Eds). Tree-ring analysis: biological, methodological and environmental aspects. London, UK, CAB International. pp. 33-53.
- Keenan, F.J., Tejada M. 1987. Maderas tropicales como material de construcción en los países del grupo andino de América del Sur. Ottawa, CA, Centro Internacional de Inv. para el Desarrollo. p. 69-89
- Llach, L. 1971. Propiedades físicas y mecánicas de ciento trece especies maderables de Panamá. Parte 3. San José, Universidad de Costa Rica, Lab. de Productos Forestales. pp. 455-540.
- Moya, R. 2004. Wood of *Gmelina arborea* in Costa Rica. New Forest 28:299-307.
- Moya, R., Muñoz F. 2010. Physical and mechanical properties of eight species from fast-growth plantation in Costa Rica. Journal of Tropical Forest Science 22(3):317-328.
- Moya, R., Muñoz F., Salas J., Berrocal A., Leandro L., Esquivel E. 2010. Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas Técnicas. (en línea). Cartago, CR, Editorial Corporación Garro y Moya. Revista Forestal Mesoamericana Kurú 7(18-19):1-207. Consultado 5 jul. 2013. Disponible en <http://www.tec-digital.itcr.ac.cr/servicios/ojs/index.php/kuru/article/view/383/316>
- Moya, R., Pérez D. 2007. Processing and marketing of teakwood products from fast-grown teak plantations in Costa Rica. In Regional Workshop Products and Marketing of Teak Wood Products of Planted Forest. (2007, Peechi, IN). Abstracts. Eds. Nair, K., Bhat K. V., Anitha V. Peechi, IN, KFRI. p. 24.
- Moya, R., Valenzuela L., Salazar F. 2002. Efecto de la fertilización de la pradera sobre la densidad básica de *Pinus radiata*. D. Don. Revista Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 11(2):182-192.
- Murillo, O., Obando G., Badiilla J., Sánchez S. 2001. Perspectivas en las zonas altas de Costa Rica. Biocenosis 15(1-2):66-71.
- Pérez, D., Kanninen M. 2001. Stand growth scenarios for *Bombacopsis quinata* plantations in Costa Rica. Forest Ecology & Management 177:427-439.
- Plomion, C., Leprovost G., Stokes A. 2001. Wood formation in trees. Plant Physiology 127:1513-1523.
- Petit, B., Montagnini F. 2004. Growth equations and rotation ages of ten native tree species in mixed and pure plantations in the humid neotropics. Forest Ecology & Management 199:243-257.

- Sader, S.A., Joyce A. 1988. Deforestation rates and trends in Costa Rica, 1940 to 1983. *Biotropica* 20:11-19.
- Serrano, J. R. 2006. Consumo de madera para construcción en Costa Rica y requerimientos para satisfacer a los usuarios. (en línea). Kurú: *Revista Forestal* 3(8):1-6. Consultado 5 enero 2013. Disponible en <http://www.tec-digital.itcr.ac.cr/servicios/ojs/index.php/kuru/article/view/515>
- Serrano, J. R., Moya R. 2013. Procesamiento, uso y mercado de la madera en Costa Rica: aspectos históricos y análisis crítico. Madrid, ES, Editorial Académica Española. p. 15
- Sotela, J., Carpio M. 1991. *Vochysia guatemalensis* en Centroamérica. Informe INII-63-1991. San José, CR, Universidad de Costa Rica, Lab. de Productos Forestales, Inst. de Investigaciones en Ingeniería. p. 11-12.
- Shupe, T.F., Aguilar R.T., Vlosky R.T., Belisle M., Chávez A. 2005. Wood properties of selected lesser-used honduran wood species. *Journal of Tropical Forest Science* 17:438-446.
- Tuk, J. 1980. Informe general del proyecto: Clasificación y normalización de maderas para uso estructural. Cartago, CR, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Centro de Investigaciones de Ing. en Maderas. p. 11.
- Tuk, J. 2010. Madera, diseño y construcción. 2ª ed. San José, CR, Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. p. 87-100
- Zobel, B., Sprague J. 1998. Juvenile wood in trees. New- York, US, Springer-Verlag. p. 147-148.

Anexo 1. Cálculo de esfuerzos de diseño

Propiedad	Promedio (MPa)	Desviación Estándar (MPa)	Quinto Percentil (MPa)	Razón de Resistencia G1	Razón de Resistencia G2	Razón de Resistencia G3	Factor de ajuste	Ajuste por secado	Grado 1	Grado 2	Grado 3
Acacia (Acacia mangium)											
F _b	78,4	1,22	66,20	0,7	0,55	0,4	0,435	0,851	17,1	13,5	9,8
E	12310	1010	12310	1,0	0,9	0,8	1,064	0,905	11851	10666	9481
E _{min}	12310	1010	10395	1,0	0,9	0,8	1,064	0,905	10008	9007	8006
F _c	34,0	3,37	28,71	0,7	0,55	0,4	0,476	0,696	6,7	5,2	3,8
F _{C_⊥}	24,0	2,52	19,95	1,0	1,0	1,0	0,599	1,000	12,0	12,0	12,0
F _v	9,6	1,52	6,73	0,5	0,5	0,5	0,435	0,920	1,3	1,3	1,3
F _t	89,7	2,08	75,74	0,4	0,3	0,2	0,435	0,851	11,2	8,4	5,6
Jaúl (Alnus acuminata)											
F _b	51,9	1,93	43,83	0,7	0,55	0,4	0,435	0,851	11,4	8,9	6,5
E	7700	2310	7700	1,0	0,9	0,8	1,064	0,905	7413	6672	5930
E _{min}	7700	2310	3435	1,0	0,9	0,8	1,064	0,905	3307	2976	2645
F _c	29	1,44	24,49	0,7	0,55	0,4	0,476	0,696	5,7	4,5	3,2
F _{C_⊥}	7,9	2,13	3,88	0,5	0,5	0,5	0,435	0,920	0,8	0,8	0,8
F _v	67,7	2,44	57,17	0,4	0,3	0,2	0,435	0,851	8,5	6,3	4,2
F _t	15,6	1,8	12,54	1,0	1,0	1,0	0,599	1,000	8,0	8,0	8,0
Pochote (Bombapcosis quinata)											
F _b	35,8	2,01	30,23	0,7	0,55	0,4	0,435	0,851	7,8	6,2	4,5
E	5600	1990	5600	1,0	0,9	0,8	1,064	0,905	5391	4852	4313
E _{min}	5600	1990	2093	1,0	0,9	0,8	1,064	0,905	2015	1814	1612
F _c	8,7	2,29	4,36	0,7	0,55	0,4	0,476	0,696	1,0	0,8	0,6
F _{C_⊥}	10,7	2,4	6,08	1,0	1,0	1,0	0,599	1,000	3,6	3,6	3,6
F _v	4,7	1,71	1,71	0,5	0,5	0,5	0,435	0,920	0,3	0,3	0,3
F _t	43	3,29	36,31	0,4	0,3	0,2	0,435	0,851	5,4	4,0	2,7
Ciprés (Cupressus lusitanica)											
F _b	57,6	1,85	48,64	0,7	0,55	0,4	0,435	0,851	12,6	9,9	7,2
E	7600	2720	7600	1,0	0,9	0,8	1,064	0,905	7317	6585	5853
E _{min}	7600	2720	2818	1,0	0,9	0,8	1,064	0,905	2713	2442	2171
F _c	14,3	1,56	11,73	0,7	0,55	0,4	0,476	0,696	2,7	2,1	1,6
F _{C_⊥}	24,1	1,65	20,35	1,0	1,0	1,0	0,599	1,000	12,2	12,2	12,2
F _v	9,4	1,54	6,47	0,5	0,5	0,5	0,435	0,920	1,3	1,3	1,3
F _t	52,2	3,87	44,08	0,4	0,3	0,2	0,435	0,851	6,5	4,9	3,3
Melina (Gmelina arborea)											
F _b	50,3	0,87	42,47	0,7	0,55	0,4	0,435	0,851	11,0	8,6	6,3
E	8300	1490	8300	1,0	0,9	0,8	1,064	0,905	7991	7192	6393
E _{min}	8300	1490	5438	1,0	0,9	0,8	1,064	0,905	5235	4712	4188
F _c	31,8	5,86	20,52	0,7	0,55	0,4	0,476	0,696	4,8	3,7	2,7
F _{C_⊥}	-	-	-	1,0	1,0	1,0	0,599	1,000	-	-	-
F _v	6,3	1,0	4,41	0,5	0,5	0,5	0,435	0,920	0,9	0,9	0,9
F _t	47,0	8,0	31,72	0,4	0,3	0,2	0,435	0,851	4,7	3,5	2,3
Roble coral (Terminalia amazonia)											
F _b	74,6	1,58	62,99	0,7	0,55	0,4	0,435	0,851	16,3	12,8	9,3
E	11910	900	11910	1,0	0,9	0,8	1,064	0,905	11466	10320	9173
E _{min}	11910	900	10057	1,0	0,9	0,8	1,064	0,905	9682	8714	7746
F _c	17,9	1,2	15,12	0,7	0,55	0,4	0,476	0,696	3,5	2,8	2,0
F _{C_⊥}	22,3	2,23	18,83	1,0	1,0	1,0	0,599	1,000	-	-	-

Propiedad	Promedio (MPa)	Desviación Estándar (MPa)	Quinto Percentil (MPa)	Razón de Resistencia G1	Razón de Resistencia G2	Razón de Resistencia G3	Factor de ajuste	Ajuste por secado	Grado 1	Grado 2	Grado 3
F_v	4,5	2,57	0,85	0,5	0,5	0,5	0,435	0,920	0,2	0,2	0,2
F_t	56,7	2,72	47,88	0,4	0,3	0,2	0,435	0,851	7,1	5,3	3,5
Sura (<i>Terminalia oblonga</i>)											
F_b	82,3	0,88	69,50	0,7	0,55	0,4	0,435	0,851	18,0	14,1	10,3
E	8070	1370	8070	1,0	0,9	0,8	1,064	0,905	7769	6992	6215
E_{min}	8070	1370	5454	1,0	0,9	0,8	1,064	0,905	5251	4726	4201
F_c	37,5	0,843	31,67	0,7	0,55	0,4	0,476	0,696	7,3	5,8	4,2
$F_{c\perp}$	35,3	1,16	29,81	1,0	1,0	1,0	0,599	1,000	17,8	17,8	17,8
F_v	7,6	0,78	6,36	0,5	0,5	0,5	0,435	0,920	1,3	1,3	1,3
F_t	65,1	2,85	54,97	0,4	0,3	0,2	0,435	0,851	8,1	6,1	4,1
Teca (<i>Tectona grandis</i>)											
F_b	95,1	8,17	80,30	0,7	0,55	0,4	0,435	0,851	20,8	16,3	11,9
E	13100	1120	13100	1,0	0,9	0,8	1,064	0,905	12612	11351	10090
E_{min}	13100	1120	11062	1,0	0,9	0,8	1,064	0,905	10650	9585	8520
F_c	42,5	4,91	34,15	0,7	0,55	0,4	0,476	0,696	7,9	6,2	4,5
$F_{c\perp}$	9,6	1,05	7,87	1,0	1,0	1,0	0,599	1,000	4,7	4,7	4,7
F_v	6,2	1,05	4,20	0,5	0,5	0,5	0,435	0,920	0,8	0,8	0,8
F_t	91,2	20,1	52,45	0,4	0,3	0,2	0,435	0,851	7,8	5,8	3,9
Chancho blanco (<i>Vochysia guatemalensis</i>)											
F_b	40,4	1,03	34,11	0,7	0,55	0,4	0,435	0,851	8,8	6,9	5,0
E	6410	1070	6410	1,0	0,9	0,8	1,064	0,905	6171	5554	4937
E_{min}	6410	1070	4372	1,0	0,9	0,8	1,064	0,905	4209	3788	3367
F_c	21,3	1,31	17,99	0,7	0,55	0,4	0,476	0,696	4,2	3,3	2,4
$F_{c\perp}$	14,5	1,58	11,90	1,0	1,0	1,0	0,599	1,000	7,0	7,0	7,0
F_v	6,3	1,64	3,19	0,5	0,5	0,5	0,435	0,920	0,6	0,6	0,6
F_t	39,4	2,77	33,27	0,4	0,3	0,2	0,435	0,851	4,9	3,7	2,5

Donde: F_b : Esfuerzo en flexión, E: Módulo de elasticidad, E_{min} : Módulo de elasticidad mínimo, F_c : Esfuerzo en compresión paralela, $F_{c\perp}$: Esfuerzo en Compresión perpendicular al grano, F_v : Esfuerzo en cortante, F_t : Esfuerzo en tensión paralela al grano.