

Variación radial de la anatomía, densidad y durabilidad de la madera de teca (*Tectona grandis*) procedente de dos calidades de sitio y dos regiones climáticas de Costa Rica

R. Moya^{1*}, A. Berrocal¹, J. R. Serrano¹ y M. Tomazello Fo²

¹ Escuela de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Apartado 159-7050-Cartago-Costa Rica.

² Departamento de Ciências Florestais. ESALQ/Universidade de São Paulo. Av. Pádua Dias, 11-Caixa Postal 09. CEP 13418-900-Piracicaba. São Paulo Brasil.

Resumen

Con el objetivo de mostrar la variación radial de las características anatómicas, de densidad normal y de durabilidad natural de la madera de *Tectona grandis* L.f. creciendo en Costa Rica, se muestrearon plantaciones de 13 años procedentes de dos regiones con clima diferente: clima húmedo tropical (CHT) y clima seco tropical (CST). En cada una de ellas se analizaron dos tipos de sitios con diferente fertilidad: bueno (SB) y malo (SM). Se encontró que las fibras y los radios no fueron afectados por el tipo de clima o calidad de sitio, a excepción de la longitud de la fibra que sí fue afectada. Se encontró que CST produce mayor frecuencia de vasos, pero en su mayoría solitarios en relación al CHT, la densidad normal promedio, máxima y su variación dentro del anillo, presentan magnitudes mayores en CST que CSH. La calidad de sitio no afectó estas variables. La resistencia al ataque de hongos fue similar en el duramen próximo a la médula y el duramen próximo a la albura para los dos tipos de clima y las calidades de sitio. No obstante, se observó que en algunos árboles la resistencia al ataque de los hongos del duramen fue similar a la albura.

Palabras clave: madera juvenil, durabilidad, crecimiento rápido, anatomía, densidad, rayos X.

Abstract

Radial variation of anatomical features, wood density and decay resistance in teak (*Tectona grandis*) from two qualities of growing sites and two climatic regions of Costa Rica

The objective of this study was to show the radial variation of some anatomic characteristics, wood density and natural durability of teak (*Tectona grandis* L.F.) growing in Costa Rica. Samples of trees 13 years old were obtained from two growing sites (high and low growing) of plantations established in a humid tropical climate (CHT) and dry tropical climate (CST). The variables measured of the fibers as well as for the rays were not affected by the climate or the type of growing site, except for the length of the fibers. The fibers of teak wood from the best growing site were significantly larger. Vessels were found with a greater frequency for the CST but mostly solitary in comparison with the CHT. Average density, maximum density and the variation within the ring presented a light higher magnitude for the CST. The quality of the growing site did not affect these variables. The resistance of fungus attack was similar in the area of heartwood near the pith compared to the heartwood near the sapwood for all the conditions evaluated. Nevertheless, it was observed in some trees a similar resistance of fungus attack for areas of sapwood compared to similar areas of heartwood.

Key words: juvenile wood, decay resistance, fast growth, wood anatomy, wood density, x-rays.

Introducción

La *Tectona grandis* Linn F. es una especie forestal, que está siendo plantada en grandes extensiones en algunos países tropicales de América Latina, Asia, África y Oceanía, abarcando alrededor de 6 millones de hectáreas (FAO, 2006). En Costa Rica la teca se ha plantado en una gran variedad de sitios y regiones del país, los cuales abarcan una gran variedad de climas y condiciones topográficas (Alvarado y Fallas, 2004; Moya y Pérez, 2008). No obstante, la región costera del Océano Pacífico, con un clima seco tropical, caracterizado por la presencia de una estación seca bien definida; y la zona norte y noroeste del país, con clima tropical húmedo a muy húmedo, con un periodo seco muy reducido (Bolaños y Watson 1993) sobresalen por su área plantada. En ambas regiones de Costa Rica es frecuente encontrar la teca plantada en sitios de excelente productividad y de buen desarrollo en diámetro de los árboles, hasta sitios con poco desarrollo en diámetro y baja productividad (Pérez y Kanninen, 2005; Bermejo *et al.*, 2004).

Las condiciones tropicales de América y el amplio mercado de la teca, han permitido que el aprovechamiento industrial sea realizado en árboles con menos de 30 años de edad (Pérez y Kanninen, 2005), lo cual se considera muy bajo en relación a los turnos de corta obtenidos en los países de Asia, que oscilan entre 30-50 años (Bhat, 2000).

El crecimiento de la teca en Costa Rica, en relación a otras regiones del mundo, es considerado como muy bueno, sin embargo, dentro del mismo país se tienen desarrollos en diámetro y productividad de las plantaciones muy diversos, influenciado principalmente por la variabilidad en la fertilidad de los suelos (Alvarado y Fallas, 2004). Idealmente las plantaciones de teca deberían crecer en un sitio calidad 1, donde la productividad y desarrollo en diámetro son de 190 m³/ha y 45 cm, respectivamente, a la edad de corta (20-25 años). No obstante es posible encontrar plantaciones en sitios de inferior calidad con productividad inferior a 150 m³/ha y un desarrollo en diámetro menor a 25 cm (Pérez y Kanninen, 2005).

Así mismo, las propiedades de la madera se ven afectadas, por el tipo de clima y tipo de suelo, alterando su calidad, lo cual puede repercutir en la industrialización y procesamiento de las trozas procedentes de las plantaciones forestales (Cutter *et al.*, 2004, Saranpää, 2003). Específicamente en teca, Bhat y Priya (2004), establecieron que la madera procedente de sitios de baja fertilidad produce una baja resistencia mecánica, atribuida a

una mayor cantidad de parénquima y bajo contenido de fibras. Así mismo, la formación de madera juvenil y del duramen, las propiedades físicas y mecánicas de la madera y su composición química se ven alterados por el sitio donde se desarrollen las plantaciones (Bhat *et al.*, 2001; Kokutse *et al.*, 2004; Kjer *et al.*, 1999; Pérez y Kanninen, 2003; Windeisen *et al.*, 2003; Thulasidas y Bhat, 2007; Bhat *et al.*, 2005).

El presente estudio tiene como propósito evaluar la variación que se da en los elementos celulares de la madera (fibras, vasos y radios), la densidad normal y la durabilidad natural de la madera de teca, procedente de una clara comercial, para dos condiciones de clima (tropical seco y tropical húmedo) y dos calidades de sitios (bueno y malo).

Metodología

Áreas y sitios de estudio: Se seleccionaron dos regiones climáticas de Costa Rica de condiciones ecológicas bien diferenciadas. Una localizada próxima a la costa del Mar Caribe, y la otra en la costa del Océano Pacífico, clasificada como clima húmedo tropical (CHT) y clima seco tropical (CST), respectivamente (Bolaños y Watson, 1999). La región climática CHT se ubica entre las coordenadas N10°15' - N10°50' y W83°15' - W83°60', con precipitación media anual de 4000 mm y una temperatura que oscila entre 20 y 32°C, con menos precipitación entre los meses de Diciembre a Abril, permitiendo que en este sitio haya un exceso de agua en el suelo durante todo el año. La región ecológica CST se ubica entre las coordenadas N09°00' - N9°50' y W83° 30' - W84°50': esta zona presenta una precipitación media al año de 3630 mm y la temperatura oscila entre los 20 y 32°C, con estación seca bien definida entre los meses de Diciembre a Marzo, permitiendo que los sitios presenten déficit hídrico durante ese periodo. En esta región de Costa Rica se presentan las mejores condiciones para el desarrollo de la teca, por la composición química del suelo y la distribución anual de las lluvias.

Plantaciones muestreadas: Se seleccionaron dos plantaciones de 13 años de edad en cada región. Una clasificada como de alta productividad con rendimiento sobre 150 m³/ha, denominada como sitio bueno (SB) y la otra de baja productividad (menor a 100 m³/ha), llamado sitio malo (SM). Todas las plantaciones fueron establecidas a una densidad inicial de 1111 árboles hectárea⁻¹ (distanciamiento de 3 x 3 m). Las plantaciones

establecidas en CHT presentan un mejor crecimiento en diámetro y un mayor manejo de raleos a la edad de 12 años, llegando a tener una densidad final de la plantación entre 200-220 árboles hectárea⁻¹. Mientras que las plantaciones de CST son de menor crecimiento, por lo tanto se requiere una menor intensidad de manejo, de ahí que presenten una mayor densidad de plantación en relación con CHT (Tabla 1).

Selección de los árboles: próximo a las parcelas permanentes que se encuentran en cada una de las plantaciones, fueron seleccionados y cortados 6 árboles con el diámetro promedio de la plantación, sin torceduras, con ramas normales y sin presencia de daños por hongos o insectos. En cada uno de ellos se marcó la posición norte, posteriormente dos discos de un espesor de 4 cm fueron cortados a la altura de 1,3 m, equivalente al diámetro a la altura del pecho (DAP).

Muestreo dentro del disco: uno de los discos fue utilizado en la determinación de las características anatómicas y densidad normal de la madera por rayos-x. Para ello se cortó una sección diametral de aproximadamente 1 cm de ancho en dirección norte-sur (Figura 1a). Posteriormente, fue cortada una sección transversal de $1 \pm 0,045$ mm de espesor en la parte superior de la muestra como indica la figura 1a. Esta sección transversal fue irradiada con rayos-x para la determinación de los parámetros de la densidad. La parte restante de la sección diametral se dividió en dos partes tomando como referencia la médula (Figura 1a). La posición norte de la sección fue lijada y pulida con la finalidad de visualizar los anillos de crecimiento. Seguidamente los anillos correspondientes a las edades de 1, 3, 5, 7, 9 y 11 años fueron separados para la obtención de los cortes histológicos en sentido transversal y tangencial. Los anillos de la edad de 13 años no fueron considerados debido a

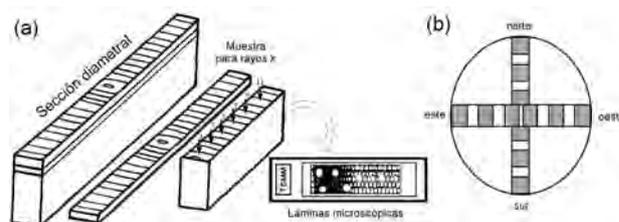


Figura 1. Obtención de muestras para análisis de rayos x, material macerado, láminas microscópicas y bloques para durabilidad natural de la sección transversal del disco al DAP.

que no se había cumplido el ciclo de crecimiento. También fue extraído material de los anillos de crecimiento de todas las edades para la determinación de las dimensiones de las fibras por maceración.

El segundo disco fue usado para obtener las muestras para el ensayo de durabilidad natural, para lo cual se tomaron muestras en 3 posiciones radiales del disco, la primera posición fue cerca de la médula, la segunda fue a la mitad de la distancia entre médula-corteza y la tercera fue próxima a la corteza. Las dimensiones de las probetas fueron 2 x 2 x 2 cm. Este muestreo se repitió en la dirección de los 4 puntos cardinales (Figura 1b), en cada punto fueron cortadas 2 muestras.

Propiedades anatómicas: las dimensiones de las fibras (longitud, diámetro del lumen y la fibra y el espesor de la pared) fue realizado sobre material macerado y sobre las láminas permanentes del corte transversal y tangencial y utilizando los estándares de la Asociación Internacional de Anatomistas de la Madera (IAWA) para madera latifoliadas (IAWA 1989). Se determinaron los siguientes parámetros anatómicos: diámetro y frecuencia de los vasos, porcentaje de vasos múltiples (vasos compuestos de 2-4 células), ancho y frecuencia de los radios, así como cantidad de células que componen los

Tabla 1. Condiciones cuantitativas y de manejo de las plantaciones de *Tectona grandis* evaluadas

Región	Sitio	Densidad (árboles ha ⁻¹)	Diámetro altura del pecho (cm)	Tasa de crecimiento (mm/año)	Altura total (m)	Área basal (m ² ha ⁻¹)	Manejo
CHT	SB	210	37,0	26,4	22,8	22,77	Manejo de maleza, poda hasta 4 m y 4 raleos (uno sanitario y 3 comerciales)
	SM	210	25,9	18,5	20,8	11,32	
CST	SB	290	31,0	22,1	24,6	22,06	Manejo de maleza, poda incompleta y 2 raleos (uno sanitario y 2 comerciales)
	SM	390	19,4	13,9	19,0	11,63	

radios en el ancho. La preparación del material macerado y las láminas permanentes fueron realizadas aplicando el procedimiento propuesto por Franklin Ruzin (1999), ambos procedimientos detallados ampliamente por Moya y Tomazello (2008). Para determinar las dimensiones de las fibras, se midieron 50 fibras sobre fotografías digitales a 10X para el largo y con un aumento de 100X para medir el diámetro del lumen y de la fibra. El espesor de pared celular fue determinado por la diferencia entre el diámetro del lumen y el diámetro de la fibra. Para la frecuencia de los vasos, fueron tomadas 8 fotografías digitales a un aumento de 4X de la sección transversal recorriendo todo el área del corte microscópico, el diámetro del vaso se determinó en 25 vasos a un aumento de 40X. Para la frecuencia de los radios, se tomaron nuevamente 8 fotografías digitales a un aumento de 4X, recorriendo la sección tangencial de la muestra microscópica. Para determinar el ancho y la cantidad de células de los radios se tomaron fotografías de 25 radios a un aumento de 40X. Las mediciones de estos elementos anatómicos fueron realizadas con el programa IMAGE TOOL® desarrollado por el Centro Científico de la Salud (“Health Science Center”) de la Universidad de Texas, Estados Unidos (<http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/download.html>).

Densidad normal de la madera: Las muestras de $1\pm 0,045$ mm de espesor se acondicionaron a un contenido de humedad de 12%, posteriormente fueron expuestas a rayos X usando un Hewlett Packard Faxitron (Modelo 43805 N) ajustado previamente (tiempo: 5 minutos; energía: 16 Kv; intensidad: 3 mA). Las fotografías de las muestras de madera fueron escaneadas en una escala de 256 grises, con una resolución de 1000 dpi y en la lectura se utilizó el software CERD. En la determinación de los valores promedios, máxima y mínima de la densidad normal, así como la variación dentro del anillo de crecimiento se utilizó el método de Walker and Dood’s (1988). Este método de determinación de densidad es también ampliamente detallado en Moya y Tomazello (2007).

Durabilidad de la madera: Los ensayos se llevaron a cabo, siguiendo la norma ASTM D-2017-81 (2003) para ensayos acelerados de resistencia natural a la pudrición. Se utilizaron frascos de sección redonda con tapa metálica. El medio de cultivo empleado fue suelo orgánico. Los hongos utilizados en estos ensayos fueron *Trametes versicolor* (L.) Pil. y *Pycnoporus sanguineus* (L.) Murrill, ambos reconocidos como de pudrición blanca agresiva en especies de maderas latifoliadas (Kokutse, et al., 2006).

Resultados

Variación de las dimensiones de la fibra

Las variaciones de las dimensiones de las fibras oscilaron de 0,70 mm a 1,60 mm para la longitud (Figura 2a), entre 21 y 29 μm para el diámetro (Figura 2b), entre 11 y 20 μm para el diámetro del lumen (Figura 2c), mientras que el espesor de la pared celular varió de 3,2 a 5,7 μm (Figura 2d). En la longitud y diámetro de la fibra, así como en el espesor de la pared celular, se observó un incremento con la edad cambial para las procedencias y las dos calidades de sitios (Figura 2a, 2b y 2d). En relación al diámetro del lumen se encontró que este se mantiene constante con la edad, para los diferentes tipos de clima y calidades de sitios (Figura 2c). En los parámetros que ocurrió un incremento de la dimensión de la fibra con la edad, se observó una inflexión entre los 2-8 años, dependiendo del parámetro, el tipo de clima y la calidad de sitio (Tabla 2). Específicamente para el longitud de la fibra, el punto de inflexión ocurrió a la edad de los 5 años para la procedencia CHT y el SM, mientras que para otra procedencia y calidades de sitios siempre se observa un incremento de la longitud con la edad del árbol (Figura 2a, Tabla 2). Para el diámetro de la fibra, en la procedencia CHT, la edad donde ocurre la inflexión fue en las edades de 2 y 3 años para el SB y SM, respectivamente. En tanto que la procedencia CST estas edades fueron mayores, de 4 años para SM y 5 años para el SB (Figura 2b, Tabla 2). Para el espesor de la pared celular de la fibra, el punto de inflexión tuvo lugar en edades superiores a los anteriores parámetros, concretamente entre 6-8 años (Figura 2d, Tabla 2). En los árboles procedente de CHT, la edad donde se da la inflexión fue a los 7 años para SB y 8 años para SM, mientras que en los dos sitios de CST, la edad donde tuvo lugar la inflexión fue de 6 años (Figura 2d, Tabla 2).

Las dimensiones de las fibras que componen la madera, en general se ven poco afectadas por la procedencia de los árboles o la calidad de los sitios (Figura 2). La longitud de la fibra, fue el parámetro que mostró una pequeñas diferencia entre los dos tipos de climas en algunos años. En los sitios SB y SM del CST, se observa madera con longitudes de fibras mas largas que los sitios del CHT. También se observó que la fibra del SM es más corta que el resto de los sitio después de 8 años de edad. Así mismo no se evidenció diferencia en la longitud de la fibra para el SB en los dos tipos de climas (Figura 2a). Por su parte el diámetro del lumen, no mos-

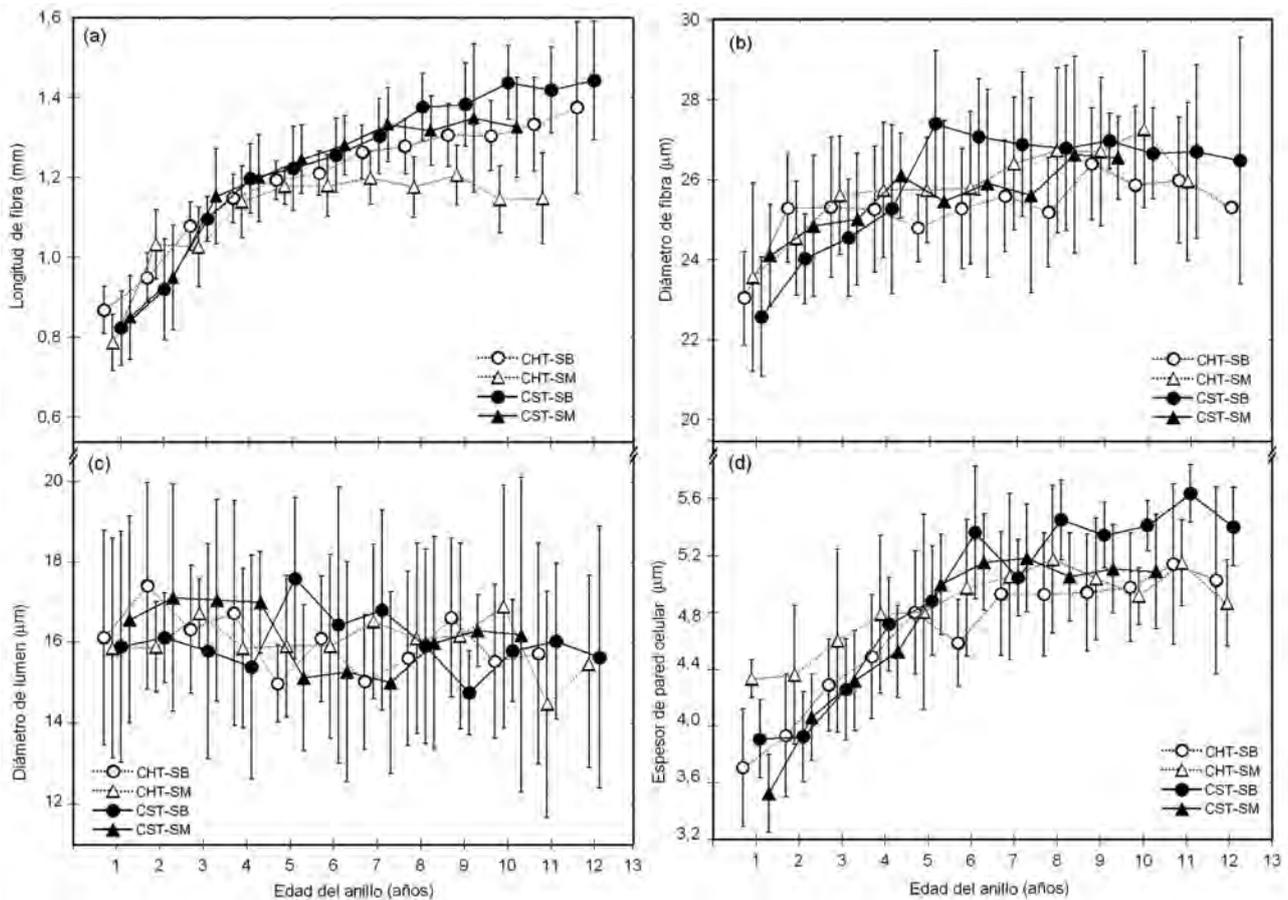


Figura 2. Variación de las dimensiones de la fibra en árboles de teca (Sobre cada una de las medias son representados los intervalos de confianza para las medias para un nivel de 0,05).

tró ninguna diferencia entre las diferentes calidades de sitios y las diferentes condiciones de clima (Figura 2b y 2c). Por su parte, el espesor de la pared celular, hasta la edad de 8 años, no mostró diferencias en las diferentes condiciones muestreadas, sin embargo, después de esta edad el sitio SM del CST, muestra una pared celular ligeramente más gruesa que el resto de plantaciones muestreadas (Figura 2d).

Variación del diámetro, frecuencia de los vasos y composición de los vasos

Para todas las procedencias, el diámetro de los vasos varió entre 100 y 195 μm (Figura 3a), con respecto a la frecuencia se midieron valores de 2 a 10 vasos por mm^2 (Figura 3b) y entre el 9 y 55% de los vasos que componen la sección transversal eran vasos compuestos de 2-5 células por vaso (Figura 3c). El diámetro de los vasos incrementó con la edad del árbol, sin embargo se dio

nuevamente una inflexión en esta tendencia entre los 5 y 7 años de edad (Figura 3a, Tabla 2). En los árboles provenientes de las dos calidades de sitio del CST y el SM del CHT, la inflexión ocurrió a la edad de 7 años, en tanto que en los árboles del SB del CHT, esta inflexión se presentó a los 5 años (Figura 3a, Tabla 2). La frecuencia de vasos disminuyó aceleradamente en el rango de edad de 1-5 años, para luego mantenerse relativamente constante con la edad del árbol. En este parámetro, la inflexión se dio a la edad de 5 años en los árboles procedentes de los dos tipos de clima y las dos calidades de sitio (Figura 3b, Tabla 2). Con respecto al porcentaje de vasos múltiples, entre el rango de 1-7 años se presentan algunas leves fluctuaciones, pero se podría afirmar que se mantiene constante en términos generales, posteriormente se observa una pequeña inflexión a los 7 años (Tabla 2). La tendencia, luego esta edad, es de un aumento en la cantidad de vasos múltiples, para los dos tipos de climas y las dos calidades de sitio (Figura 3c).

Tabla 2. Tipo de tendencia ocurrida en *T. grandis* con la edad del árbol y edad donde ocurre la inflexión.

Característica de la madera	Parámetro	CHT-SB	CHT-SM	CST-SB	CST-SM
Fibras	Longitud	+ (NO)	+ (5)	+ (NO)	+ (NO)
	Diámetro de fibra	+ (2)	+ (3)	+ (5)	+ (4)
	Diámetro de lumen	NO	NO	NO	NO
	Espesor de pared	+ (7)	+ (8)	+ (6)	+ (6)
Vasos	Diámetro	+ (5)	+ (7)	+ (7)	+ (7)
	Frecuencia	- (5)	- (5)	- (5)	- (5)
	Porcentaje de vasos múltiples	+ (7)	+ (7)	+ (7)	+ (7)
Radios	Frecuencia	- (5)	- (5)	- (5)	- (5)
	Ancho	+ (5)	+ (3)	+ (5)	+ (5)
	Cantidad de células por radio	+ (5)	+ (3)	+ (5)	+ (3)
Densidad normal	Promedio	+ (4)	+ (4)	+ (7)	+ (7)
	Máxima	+ (5)	+ (5)	+ (6)	+ (6)
	Mínima	+ (4)	+ (4)	+ (4)	+ (NO)
	Variación dentro anillo	NO	NO	+ (4)	+ (3)

Donde: + tendencia positiva entre el parámetro y la edad del árbol
 - tendencia negativa entre el parámetro y la edad del árbol
 Valor entre paréntesis indica la edad donde ocurre la inflexión en la variación radial
 NO= No ocurre variación

El elemento celular del vaso, fue el más afectado por la calidad de sitio donde crecen los árboles. Se determinó que los sitios malos producen madera con diámetros de los vasos significativamente mayores, en comparación con la madera de sitios buenos luego del primer año (Figura 3a). También se comprobó que los árboles que se desarrollan en un clima tropical húmedo, producen madera con menor frecuencia de vasos

(Figura 3b), pero con mayor porcentaje de vasos múltiples (Figura 3c).

Variación de la frecuencia, ancho y cantidad de células en los radios

La frecuencia de radios varió de 15 a 34 radios por milímetro lineal (Figura 3d), en tanto que el ancho de los mismos se mantuvo en un rango de 29 a 90 μm (Figura 3e) y la cantidad de células en el radio varió de 1,5 a 5,5 células por radio (Figura 3f). Como ocurrió con las fibras y los vasos, un cambio en el comportamiento con la edad del árbol ocurrió entre los 3 y 5 años (Tabla 2). En relación a la frecuencia de los radios, ésta disminuyó rápidamente entre el primer y el quinto año, posteriormente se mantuvo relativamente constante con el aumento de la edad del árbol (Figura 3d) para las dos procedencias y las dos calidades de sitio (Figura 3d). En lo referente al ancho de los radios, antes de 3-5 años, el ancho aumentó con la edad del árbol. Posteriormente, se observa una inflexión a la edad de 5 años (Tabla 2), para las dos calidades de sitio de CST y el SB del CHT, en tanto que en el SM del CHT la inflexión ocurrió a los 3 años de edad (Figura 3e). La cantidad de células que componen los radios, incrementó rápidamente del primer año a los 5 años de edad, esto para los sitios malos de los dos tipos de clima, posteriormente se mantiene relativamente constante con la edad. Por su parte, en los sitios malos, se dio la inflexión en el año 3 (Figura 3f, Tabla 2).

Aunque se observa que los árboles que crecen en el CHT presentan ligeramente una mayor frecuencia de radios (Figura 3d) y un ligero aumento en el ancho y cantidad de células que componen los radios en relación a los sitios del CST (Figura 3e y 3f), no se encontró diferencia estadísticamente significativa entre las condiciones evaluadas.

Variación de la densidad de la madera

La densidad normal promedio de la madera varió de 550 a 875 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Figura 4a), la densidad máxima osciló entre 700-1050 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Figura 4b), la densidad mínima varió de 375-680 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Figura 4c) y la variabilidad de la densidad dentro de anillo fue de 5-21% (Figura 4d). La densidad normal promedio aumentó con la edad del árbol, desde el primer año hasta los 10 años, en el resto de la sección transversal (11-13 años), específica-

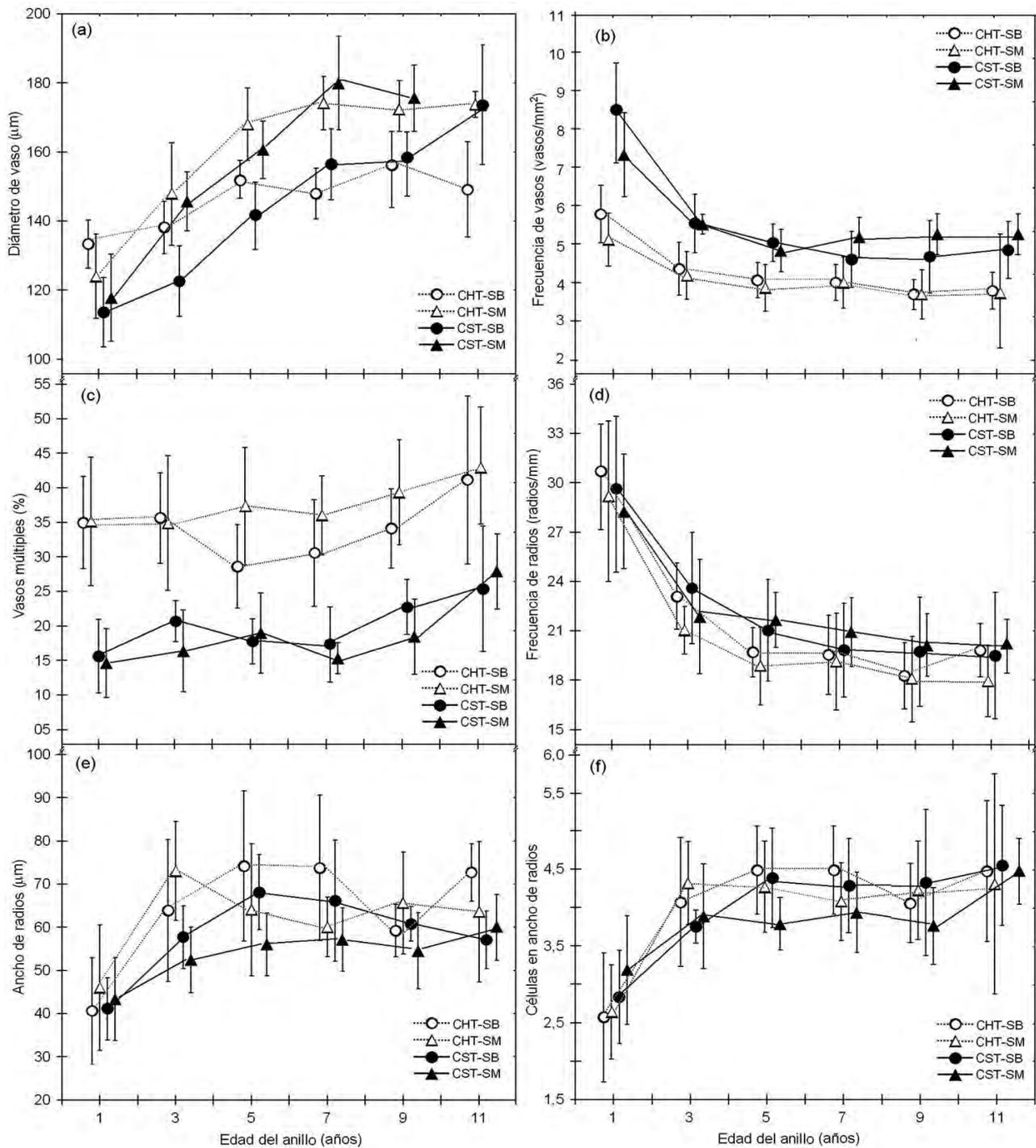


Figura 3. Variación de los parámetros de los vasos y radios con la edad de árboles de teca (Sobre cada una de las medias son representados los intervalos de confianza para las medias para un nivel de 0,05).

mente en anillos con madera de albura, ocurrió un decrecimiento en el valor de la densidad promedio, para todas las condiciones de clima y las dos condiciones de sitio (Figura 4a). En el período de 1-10 años, se obser-

vó que a la edad de 4 años para las dos calidades de sitio del CHT y a la edad de 7 años en el CST, ocurre una inflexión en la magnitud del crecimiento de la densidad promedio con la edad (Figura 4a, Tabla 2). Para la den-

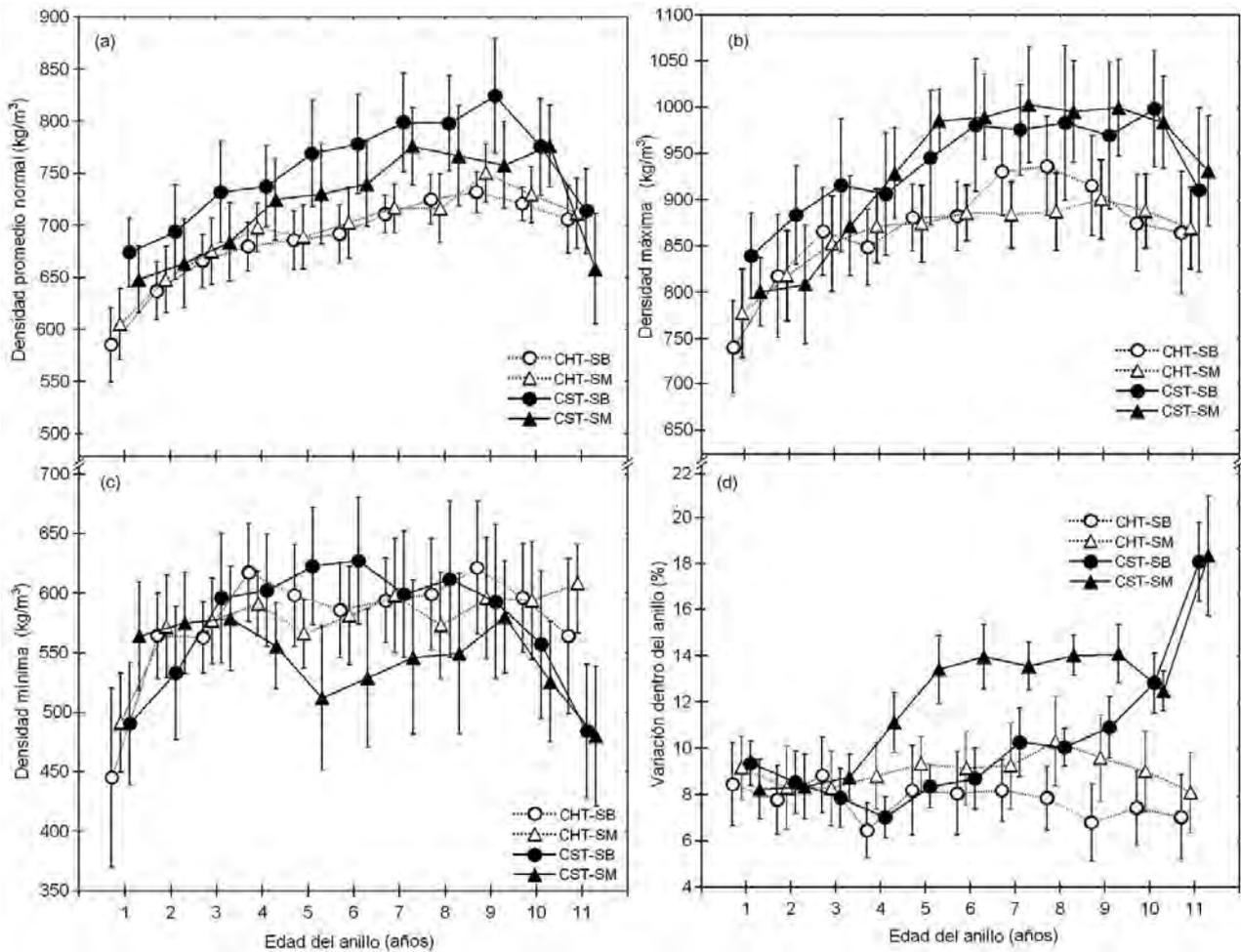


Figura 4. Variación de los parámetros de la densidad normal con la edad en árboles de teca (Sobre cada una de las medias son representados los intervalos de confianza para las medias para un nivel de 0,05).

sidad mínima y la densidad máxima, también se observa un aumento con la edad del árbol y nuevamente en los últimos dos años se manifiesta un decrecimiento de estos valores, debido a la presencia de albura en estos dos anillos (Figura 4b y 4c). En lo referente a la inflexión en la variación radial, se encontró que ésta se presenta a la edad de 5 años en los dos sitios del CHT y a los 6 años para las dos calidades de sitio del CST (Figura 4b, Tabla 2). Asimismo, ocurre un rápido incremento en la densidad mínima con la edad del árbol en el rango de 1-4 años, para las dos calidades de sitios de CHT y el sitio SB del clima CST. En tanto que en el SM del CST no se observó ninguna tendencia respecto a la edad del árbol, a excepción de lo señalado anteriormente, que en los últimos dos años decaen los valores de densidad normal (Figura 4c). Se evidenció claramente que en las dos calidades de sitios de CHT, la variabilidad de la den-

sidad de la madera dentro del anillo es relativamente constante con la edad del anillo, a diferencia de las plantaciones del CST, que entre el año 3-4 la variabilidad se mantuvo constante, pero posteriormente empezó a aumentar con la edad (Figura 4d). El incremento se mantuvo en todo el rango de edad estudiado para el SB del CST, pero en el sitio SM la variabilidad dentro de anillo aumentó entre el rango 3-6 años, y posteriormente tendió a estabilizarse desde los 6 hasta los 11 años (Figura 4d).

En la figura 4a también es posible observar que las calidades de sitio del CST son ligeramente superiores al sitios del CHT, pero se encontró que esta diferencia es estadísticamente significativa solamente entre el año 4 y el año 10 (Figura 4a). En la densidad máxima de la madera, se observan valores mayores luego de la edad de 5 años entre el SM del CST y el SM del CHT (Figura 4b).

ra 4b). En la densidad mínima no se encontró diferencia significativa entre las calidades de sitios y entre los diferentes tipos de clima (Figura 4c). En la variabilidad de la densidad normal dentro del anillo, el SM del CST es estadísticamente mayor que las dos calidades de sitio del CHT a partir del 4 año (Figura 4d).

Variación de la durabilidad de la madera

La pérdida de peso por acción del hongo *Trametes versicolor* fue muy similar a la obtenida para *Pycnoporus sanguineus*. Los valores de pérdida de peso, por acción de los dos tipos de hongos fueron menores al 11% para las dos zonas del duramen (interno e externo). Mientras que en la madera de albura, la pérdida de peso fue diferente para los dos tipos de hongos, con *T. versicolor* la pérdida de peso varió entre 30 y 50% (Figura 5a), en tanto que con el hongo *P. sanguineus* los valores fueron ligeramente menores (10-35%) (Figura 5b). Al observar el comportamiento de la variación radial de la durabilidad, no se encontró diferencias significativas entre el duramen interno y el duramen externo. Por su parte, la albura presentó menor resistencia que el duramen para los dos tipos de hongos ensayados. No se encontró diferencia significativa entre los diferentes tipos de clima y calidades de sitio (Figura 5).

Se debe hacer notar, que algunas muestras del duramen interno presentaron pérdidas de peso comparables con la pérdida de peso que se producen en la madera de albura. Dichas observaciones no fueron consideradas en el promedio del duramen, ya que son datos catalogados como "observaciones extrañas". No obstante no fueron eliminadas, ya que se observó que las muestras con valores de durabilidad similar a la albura, en todos los casos correspondían a la madera procedentes de los

árboles que se desarrollaron en el CHT, y de estas las más atacadas por *T. versicolor* fueron las que correspondían a duramen interno de los árboles (Figura 5a), la cantidad de muestras con este problema fue de 8. Con el hongo *P. sanguineus*, se encontró que 4 muestras del duramen en las dos distancias muestreadas de dos de los nueve árboles muestreados, presentaban pérdidas de peso alta, comparada con los obtenidos para la albura (Figura 5b). En la única distancia que no ocurrió una sobre-degradación del duramen fue en el duramen exterior, cuando fue probado con *T. versicolor* (Figura 5a).

Discusión

Los resultados obtenidos para los diferentes elementos celulares (fibras, vasos y radios) y la densidad normal están dentro del rango de los valores reportados para *T. grandis* creciendo en las áreas próximas a su distribución natural. En todos los parámetros anatómicos se encontró que coinciden con los valores reportados por Gottwald y Parameswaran (1980) y Tewari (1999), para diferentes países de Asia. Los valores de densidad promedio son ligeramente más altos que los encontrados por Bhat y Florence 2003, Pérez y Kanninen 2003, Moya *et al.* 2003, Windeisen *et al.* 2003, Bhat y Priya 2004, Kokutse *et al.* 2004, Pérez y Kanninen 2005, Viquez y Pérez 2005, siendo explicado esta diferencia por el hecho de que la densidad reportada por los anteriores autores es la densidad básica, mientras que el presente trabajo fue determinada la densidad normal (12% de contenido de humedad). El aumento de la densidad con la edad del árbol, también fue encontrada por Pérez y Kanninen (2003) y Moya *et al.* (2003) árboles creciendo en Costa Rica. Así mismo, Moya *et al.* (2003) establecen que a la edad de 6 años ocurre una inflexión en la tendencia de la densidad, edad muy similar a la encontrada para el presente estudio. Al considerar la densidad promedio de árboles de diferentes edades en plantaciones en Costa Rica (Pérez y Kanninen 2003) y de plantaciones de 60 años de edad en la India (Bhat *et al.*, 2001), se estableció una inflexión a los 20 años, edad muy superior a lo encontrado en el presente estudio.

Aunque en este trabajo se utilizaron árboles de crecimiento rápido y condiciones ecológicas (precipitación, longitud, latitud y altitud) diferentes que en Asia, la anatomía está dentro de los rangos de la especie, evidenciando la adaptación de los elementos anatómicos a las condiciones de Costa Rica. Aunque la anatomía del

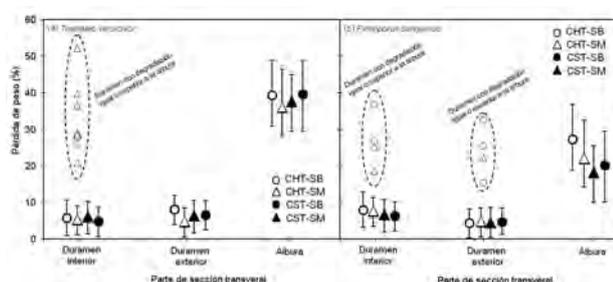


Figura 5. Variación de la pérdida de peso por ataque de dos hongos de pudrición blanca (Sobre cada una de las medias son representados los intervalos de confianza para las medias para un nivel de 0,05).

xilema en *T. grandis* puede variar con las condiciones ecológicas de sitios donde es plantada (como en Costa Rica), esto no llega a producir alteraciones significativas con la anatomía del xilema de los árboles creciendo en su hábitat natural (Moya y Tomazello, 2008).

Los elementos celulares que componen la madera mostraron en su mayoría variaciones en la dirección de la médula a la corteza. Este comportamiento radial de los elementos celulares por lo general se presenta en muchas especies (Zobel y Sprague, 1998, Sarampää, 2003) y es producido por el envejecimiento de las células cambiales que conllevan a modificaciones en la estructura de los elementos que componen la madera.

En general se observó que para los diferentes parámetros (anatómicos y densidad) de la madera de *T. grandis*, la edad del árbol produce un incremento de estos, con la excepción del diámetro del lumen y la variación de la densidad intra-anillo que se mantuvo constante y la frecuencia de radios y vasos, que disminuyeron con la edad en todas las condiciones estudiadas (Tabla 2). De acuerdo con Alone y Zimmermann (1983), la disminución en la frecuencia vasos y radios se debe a que la concentración de la auxinas, principales componentes que regulan las divisiones de las células del cambium, decrece al aumentar la edad, produciendo baja frecuencia de vasos y radios, pero con mayor diámetro y mayor dimensiones de las células de los vasos y los radios.

La presencia de vasos múltiples es común en algunas especies y pueden tener una relación con los vasos solitarios de 5:1 hasta 1:5 (Baas, 1982). La *T. grandis* presenta una relación de vasos múltiples y solitarios de 1:1 a 1:4, y esta proporción varía por la edad del árbol y el tipo de clima donde se establece la plantación (Figura 4c); siendo mayormente afectado por el tipo de clima. Los vasos múltiples son producidos en los árboles con el fin de garantizar una buena conducción de la savia en sentido longitudinal y especialmente para tener varias vías de conducción de líquido, en un mismo vaso con el fin de reducir los riesgos del embolismo, ya que existen vías alternas de un mismo conducto (Carlquist, 2003, Baas 1982).

En las especies arbóreas por lo general se ha señalado que durante los primeros años de crecimiento del árbol ocurre un cambio acelerado en las propiedades de un año a otro hasta una edad donde empiezan a estabilizar las propiedades de la madera (Zobel y Sprague, 1998), dichas regiones son conocidas como zonas de formación de madera juvenil y madera madura. Aunque, la inflexión producida en la variación radial puede

ser atribuida a la formación de madera juvenil en *T. grandis*, debe tenerse cuidado al hacer esta afirmación, ya que por un lado se ha determinado que en la teca la formación de madera juvenil oscila entre 15-25 años (Bhat *et al.*, 2001), sugiriendo con ello que los árboles utilizados en su totalidad se componen de madera juvenil. Así también en diferentes especies se ha encontrado que en las partes inferiores de los árboles se suelen presentar comportamientos anómalo en las propiedades de la madera (Evans *et al.*, 2001)

Aunque, se presentaron algunas diferencias en los parámetros de las fibras (específicamente longitud de fibra y el espesor de pared), donde se dio una notable variación entre las diferentes calidades de sitio fue en los parámetros relacionados a los vasos (Figura 3a-c). Los vasos, junto con el parénquima longitudinal (parámetro no estudiado) son considerados como los elementos anatómicos del xilema con mayor capacidad de adaptación a las condiciones de crecimiento (Carlquist, 2003, Baas, 1982 y Zimmermann 1982). En *T. grandis*, esas observaciones son confirmadas por la diferencia encontrada en el diámetro de los vasos entre las calidades de sitio (Figura 3a), diferencia de la frecuencia de vasos y la abundancia de vasos múltiples en los dos tipos de clima (Figura 3b y 3c), indicando la capacidad de adaptación de los árboles a las diferentes condiciones de clima y suelo. Las alteraciones de los vasos del xilema, son atribuidas a la necesidad de los árboles de poseer un sistema de conducción eficiente y seguro para el flujo de los contenidos fisiológicos (Bissing, 1982 y Baas, 1982). Algunos estudios similares también han mostrado, al igual que en el presente estudio, que las condiciones del sitio o clima alteran la estructura anatómica de la madera (Bhat y Priya, 2004, Bhat *et al.*, 2001).

Respecto a la densidad normal, de la misma forma que los vasos, también fue afectada por el tipo de clima y en menor grado por la clase de sitio (Figura 3), dándose el hecho de que las plantaciones de CST poseen una mayor densidad promedio y máxima (Figura 4a y 4b) y una mayor variación dentro del anillo (Figura 4c), que la madera de CHT. La explicación a este comportamiento puede ser atribuida a las variaciones en la estructura anatómica de la madera. Los árboles de CST, de mayor densidad promedio, poseen en algunas secciones de la parte transversal, fibras con una pared celular ligeramente más gruesa (Figura 2b), sin diferencia en los diámetros de los vasos (Figura 3a), mayor frecuencia de vasos (Figura 3b), pero con poca cantidad de vasos múltiples (Figura 3c) en relación a los árboles de CST. Sin

embargo estas relaciones deben ser tomadas con precaución, ya que la frecuencia de vasos trae consigo una mayor densidad a un mismo diámetro de vaso, no obstante lo que puede estar favoreciendo la densidad, es la mayor proporción de vasos solitarios en CST.

Priya y Bhat (1998, 1999) y Pumijumnonng y Park (1999) afirman que sitios de baja precipitación producen porosidad semicircular o circular, con una alta concentración de vasos con diámetro grande y alta proporción de fibras al final del anillo. En tanto que sitios de alta precipitación, tienden a producir más porosidad difusa. Estas dos condiciones dan como resultados que los árboles de CST presenten madera con mayor densidad al finalizar el anillo y bajo valor al iniciar el siguiente anillo, si se compara con la madera de CHT (Figura 6b). A su vez, al producirse una transición abrupta del anillo en los árboles de CST, la variación dentro de anillo es mayor de la que se obtiene en CHT. La Figura 6a muestra un ejemplo de un árbol de tecla de CHT y SM. En él se observa que hay poca variación al iniciar y finalizar el anillo, en tanto que la figura 6b, que muestra un árbol procedente de CST y de un mismo sitio (SM) se tiene que la densidad al final es muy alta en relación con el valor de densidad de CHT al iniciar el anillo.

La resistencia al ataque de los dos tipos de hongos como era de esperarse es muy baja en la madera de albura para las dos condiciones de clima y tipo de suelo. Pero

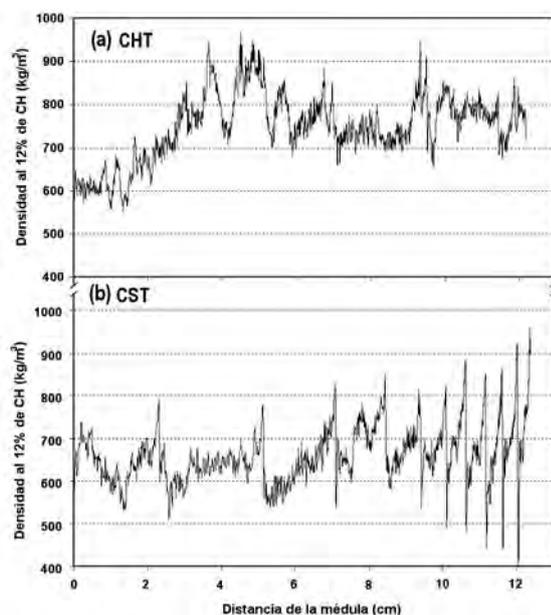


Figura 6. Variación de la densidad normal de la madera de un árbol de *T. grandis* de CHT y CST para SM en Costa Rica.

en el duramen, exceptuando los valores con pérdidas de peso similar a la albura, la resistencia al ataque de hongos fue similar entre la parte interna y la parte externa. Este resultado fue confirmado anteriormente por Bhat y Florence (2003), para varias edades de árboles de *T. grandis*. No obstante dichos autores señalan que en algunos árboles se encontró una alta degradación de la madera de duramen por el ataque de hongos, como ocurrió con los datos mostrados en la figura 6 que presentan pérdidas de peso similar a la albura. Acorde con Da Costa (mencionado por Bhat y Florece, 2003) esto se debe a que algunos árboles producen un tipo de duramen de bajo contenido de extractivos, que lo hacen poco resistente al ataque de hongos. Así mismo, Kokutse *et al.* (2006) y Bhat *et al.* (2005) encontraron que en la parte interna del árbol de *T. grandis* se da una baja resistencia al ataque de hongos, lo cual está relacionado con la formación de madera de un color pálido, lo cual no ocurre en la madera de color más oscuro. Al observar las muestras de la parte interna, que presentaron un alto porcentaje de pérdida de peso, se encontró que efectivamente estas mostraban un color muy pálido en relación a las muestras con baja pérdida de peso. Aunque no fue posible detectar diferencia en la resistencia al ataque de hongos con relación al tipo de clima, se observó que la mayor cantidad de datos del duramen con resistencia similar a la albura, se presentaron en los sitios con CHT, confirmando los resultados reportados por Bhat *et al.* (2005) y Thualasidas y Bhat (2007) quienes también encontraron que árboles procedentes de sitios húmedos son menos resistentes que los árboles que crecen en sitios secos.

Conclusiones

Los elementos celulares que componen la madera, presentaron en su mayoría variaciones en la dirección de la médula a la corteza. Se observó que para los elementos anatómicos y la densidad normal de la madera de *T. grandis*, la edad del árbol produce un incremento en ellos, con la excepción del diámetro del lumen y la variación de la densidad intra-anillo, que se mantuvieron constantes, así como en la frecuencia de radios y vasos, que disminuyeron con la edad en todas las condiciones estudiadas. Además, se observó una inflexión en el comportamiento radial de las propiedades analizadas, dicha inflexión se dio en un rango de 2 a 8 años para los diferentes elementos.

El efecto del tipo de clima o la calidad del sitio donde son establecidas las plantaciones de *T. grandis*, produ-

cen pocas variaciones en los parámetros de las fibras (específicamente longitud y espesor de pared) y de los radios (ancho, cantidad de células y frecuencia de radios). Sin embargo, donde se evidenciaron cambios importantes, fue en los parámetros relacionados a los vasos.

La densidad normal de la madera también fue afectada en mayor proporción por el tipo de clima donde se desarrolla la plantación, mientras que la clase de sitio presentó poca alteración de estos parámetros. Los árboles de plantaciones que crecen en CST, poseen mayor densidad promedio y densidad máxima, así como mayor variación de la densidad dentro del anillo, en comparación con la madera procedente de árboles de CHT.

La resistencia al ataque de hongos, como era de esperar, es muy baja en la madera de albura, en comparación con el duramen, para las dos condiciones de clima y tipo de suelo. Asimismo se encontró que en el duramen, la resistencia al ataque de hongos fue similar entre la parte interna y la parte externa. No obstante, en algunas muestras se observó que el duramen presenta valores de degradación similar a la albura, este comportamiento se dio principalmente en la madera que está cerca de la médula, en los árboles procedentes del CHT.

Agradecimientos

En especial a la Corporación Buen Precio y Barca propietarios de las plantaciones donde se realizó el muestreo y por supuesto a todo el personal de la finca donde se ubicaban. A la Virrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica por el apoyo financiero al Proyecto de Investigación.

Bibliografía

- ALONE R., ZIMMERNMANN M., 1983. The control of vessel size and density along the planta axis –A new hypothesis. *Differentiation* 24: 203-208.
- ALVARADO A., FALLAS J.L., 2004. La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (*Tectona grandis* L.f.) en suelos ácidos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 28(1): 81-87.
- ASTM-American Society for Testing and Materials., 2003. Standard method of accelerated laboratory test of natural decay resistance of woods. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.10., Philadelphia. USA. (ASTM D 2017-81 Reproved 1994)
- BAAS P., 1982. Systematic, phylogenetic and ecological wood anatomy. En: P. Baas. *New perspectives in wood anatomy: systematic, phylogenetic and ecological wood anatomy*. London, pp.23-58.
- BERMEJO I., CAÑELLAS I., SAN MIGUEL A., 2004. Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica. *Forest Ecol Manag* 189: 97–110.
- BHAT K.M. 2000. Timber quality of teak from managed tropical plantations with special reference to Indian plantation. *Bois For t des Trop* 263(1): 6-15.
- BHAT K.M., FLORENCE E.J., 2003. Natural decay resistance of juvenile teak wood grown in high input plantations. *Holzforchung* 57(5): 453-455.
- BHAT K.M., THULASIDAS P.K., FLORENCE, E.J., JAYARAMAN, K., 2005. Wood durability of home'graden teak against brown-rot and white-rot. *Trees* 19: 654-660.
- BHAT K.M., PRIYA, P.B., 2004. Influence of provenance variation on wood properties of teak from the Western Ghat Region in India. *IAWA J.25(3):273-282*.
- BHAT K.M., PRIYA P., RUGMINI P., 2001. Characterisation of juvenile wood in teak. *Wood Sci Tech* 34:517–532.
- BISSING D.R., 1982. Variation in qualitative anatomical features of the xylem of selected dicotyledon woods in relation to water availability. *Bull Torrey Bot Club* 109(3):371-384.
- BOLAÑOS R., WATSON, V., 1999. Mapa ecológico de Costa Rica. Según el sistema de clasificación de zonas de vida del mundo de L. R. Holdridge. Escala 1: 200.000. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica.
- CARLQUIST S., 2003. *Comparative wood anatomy: systematic ecological, and evolutionary aspects of dicotyliedon wood*. Springer Verlag, Germany, 436 pp.
- CUTTER B.E., COGGESHALL M.V., PHELPS J.E., STOKKE D.D., 2004. Impacts of forest management activities on selected hardwood wood quality attributes: a review. *Wood Fiber Sci* 36: 84-97.
- EVANS R., KIBBLEWHITE R.P., STRINGER S.L., 2001. Variation in microfibril angle, density and fibre orientation in twenty-nine Eucalyptus nitens trees. *Appita Journal*. 53: 450-457.
- FAO, 2006. *Global planted forest thematic study: results and analysis*. Planted Forests and trees, Working paper 38, Rome, 75 pp.
- GOTTWALD H., PARAMESWARAN N., 1980. Anatomy of wood and bark of *Tectona* (Verbenaceae) in relation to Taxonomy. *Bot Jard. System* 101(3): 363-383.
- IAWA, 1989. List of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Bull.* 10: 226-332.
- KJAER E.D., KAJORNSRICHON S., LAURIDSEN E.B., 1999. Heartwood, calcium and silica content in five

- provenances of teak (*Tectona grandis* L.). *Silvae Genetica* 48: 1-3.
- KOKUTSE A., BAILLÈRES H., STOKES A., KOKOU K., 2004. Proportion and quality of heartwood in Togolese teak (*Tectona grandis* L.f.). *Forest Ecol Manag* 189(1-3): 37-48.
- KOKUTSE A. D., STOKES A., BAILLÈRES H., KOUAMI K., BAUDASSE C., 2006. Decay resistance of Togolese teak (*Tectona grandis* L.f) heartwood and relationship with colour. *Trees*. 20: 219-223.
- MOYA R., PÉREZ D., 2008. Effect of physical and chemical soil properties on wood characteristics of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *J Trop Forest Sci* 20(3): in press.
- MOYA R., PEREZ L.D., ARCE A., 2003. Wood density of *Tectona grandis* at two plantation spacings in Costa Rica. *J Trop Forest Prod* 9(1/2): 153-161.
- MOYA R., TOMAZELLO M., 2007. Wood density and fiber dimensions of *Gmelina arborea* in fast growth trees in Costa Rica: relation to the growth rate. *Invest Agrar: Sist Recur For* 16(3): 267-276
- MOYA R., TOMAZELLO M., 2008. Variation in the wood anatomical structure of *Gmelina arborea* trees at different ecological conditions in Costa Rica. *Rev. Biol Tropical* 56(2):689-704.
- PÉREZ D., KANNINEN M., 2003. Heartwood, sapwood and bark content and wood dry density of young and mature teak (*Tectona grandis*) tree grown in Costa Rica. *Silvae Fennica*.37(1):.45-54.
- PEREZ D., KANNINEN M., 2005. Stand growth scenarios for *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Forest Ecol Manag* 210: 425-441.
- PRIYA P.B., BHAT K.M., 1998. False ring formation in teak (*Tectona grandis* L.f.) and the influence of environmental factors. *Forest Ecol Manag* 108: 215-222.
- PRIYA P.B., BHAT K.M., 1999. Influence of rainfall, irrigation and age on the growth periodicity and wood structure in teak (*Tectona grandis*). *IAWA J.* 20: 181-192.
- PUMIJUMMONG N., PARK W., 1999. Vessel chronologies from teak in northern Thailand and their climatic signal. *IAWA J.* 20: 285-294.
- RUZIN S.E., 1999. *Plant microtechnique and Microscopy*. Oxford University, Oxford, USA, 452 pp.
- SARANPÄÄ P., 2003. Wood density and growth. En BARNETT, J., JERONIMIDIS, G. *Wood Quality and its biological basis*. Blackwell Publishing CRC Press. Austria, 226 pp.
- TEWARI D.N., 1999. *A monograph on teak (Tectona grandis)*. International Book Distrutors. Dehra Dun, India, 245 pp.
- THULASIDAS P.K., BHAT K.M., 2007. Chemical extractive compounds determining the brown-rot decay resistance of teak wood. *Holz Roh-werkst* 65: 121-124.
- VIQUEZ E., PEREZ, D., 2005. Effect of pruning on tree growth, yield, and wood properties of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Silva Fennica* 39: 381-390.
- WALKER N.K., DOOD R.S., 1988. Calculation of wood density variation from x-ray densitometer data. *Wood Fiber Sci* 20(1), 35-43.
- WINDEISEN E., KLASSEN A., WEGENER G., 2003. On the chemical characterization of plantation teakwood from Panama. *Holz Roh-werkst* 61: 418-418.
- ZIMMERMANN M., 1982. Transport in the xylem. En: ZIMMERMANN M.; BROWN C.L. *Trees structure and function*. Springer-Verlag, New York, USA, 365 pp.
- ZOBEL B., SPRAGUE J.R., 1998. Juvenile wood in forest trees. Springer Verlag, New York, USA, 299 pp.
- ZOBEL B., VAN BUIJTENEN, B., 1989. *Wood Variation: its causes and control*. Springer Verlag, New Cork, USA, 363 pp.