



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN

DIRECCIÓN DE PROYECTOS

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INTEGRACIÓN BOSQUE INDUSTRIA

INFORME FINAL DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

“SECADO CONVENCIONAL PARA MADERA DE *Acacia mangium* Y *Vochysia guatemalensis* DE PLANTACIONES FORESTALES EN COSTA RICA”

INVESTIGADORES:

Ing. Roger Moya R. Ph.D.
Ing. Carolina Tenorio M. B.Sc.

Diciembre, 2010

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
DIRECCIÓN DE PROYECTOS**

**INFORME FINAL DE PROYECTO
(N° 5402-1401-1009)**

1. DATOS GENERALES

1. Nombre del Proyecto ***“Secado convencional para madera de Acacia mangium y Vochysia guatemalensis de plantaciones forestales en Costa Rica”***
2. Departamento académico o Centro responsable: Escuela Ingeniería Forestal / CIIBI.
3. Otros departamentos participantes: Ninguno.
4. Investigador(a) responsable: Ing. Roger Moya. Ph.D.
5. Investigadores participantes:

Nombre del(la) investigador(a) y grado académico	Jornada en el proyecto (hrs/sem)	Período	Nº de meses en el proyecto	Tipo de plaza*
Ing. Roger Moya Ph.D.	8	Enero-2009 Diciembre-2010	24	Docencia
Ing. Carolina Tenorio B.Sc.	20	Febrero-2009 Diciembre-2010	24	VIE

6. Fecha de inicio: 1° enero 2009
7. Fecha de finalización: 30 Diciembre 2010
8. Sesión y fecha de aprobación de Escuela: Sesión Extraordinaria:

2. RESUMEN DEL PROYECTO:

El proceso de secado de la madera es una de las principales actividades que se realiza para la utilización de la materia prima que se genera en las plantaciones forestales. El contar con madera seca permite, entre muchas otras cosas, la disminución de los costos de producción, debido a que esta ofrece las mejores condiciones de trabajabilidad y de propiedades en la elaboración de productos con este material.

En Costa Rica se han plantado una serie de especies forestales con muy excelente crecimiento y producción. No obstante, en recientes años se ha encontrado que algunas especies como la *Acacia mangium* y la *Vochysia guatemalensis* presentan serios problemas durante la etapa de secado, principalmente relacionado con la presencia de defectos, variaciones del contenido de humedad una vez que la madera está seca y el tiempo prolongado de secado. En vista de lo anterior el presente proyecto de investigación tuvo como objetivo establecer aquellos aspectos que se deben tener en cuenta durante el secado convencional de estas dos especies de madera. Se investigaron en su totalidad aquellos aspectos relacionados con las variaciones en el sentido médula-corteza, las variaciones del contenido de humedad inicial y final, la velocidad de secado, los cambios en el color de la madera y los defectos producidos en la madera antes y después del secado, para ambas especies. De las pruebas que se realizaron en estas especies se han elaborado cuatro publicaciones científicas, de las cuales ya una de ellas ha sido publicada por la revista "Maderas. Ciencia y Tecnología", y el resto se encuentra en proceso de revisión. Además se elaboro una manual de secado para cada especie, los cuales están sometidos a publicación en la "Revista Forestal Kurú" de la Escuela de Ingeniería Forestal y en la revista "Tecnología en Marcha" del ITCR. Así mismo estas dos publicaciones fueron reducidas en dos "plegables" para divulgar en públicos menos especializados, como técnicos u operadores de secadoras. Mediante estas publicaciones se establecieron aquellos criterios relevantes a considerar durante el proceso de secado de las dos especies, de forma tal que se obtenga un mayor aprovechamiento y calidad de la madera aserrada proveniente de trozas de plantaciones forestales implementadas en Costa Rica.

Palabras clave: *secado de madera, contenido de humedad, defectos de secado, programas de secado, control de humedad, uniformidad de la humedad.*

SUMMARY: Conventional dry for *Acacia mangium* and *Vochysia guatemalensis* wood from fast growth plantation in Costa Rica.

The drying process of wood is one of the main activities to be performed for the use of raw material generated in forest plantations. Having dry wood allows, among other things, lower production costs, because this provides the best working conditions and properties in the production with this material.

In Costa Rica, there are a lot of planted forest species with very good growth and production. However, in recent years it have found that some species such as *Acacia mangium* and *Vochysia guatemalensis* present serious problems during the drying process, mainly related to the presence of defects, changes in the moisture content once the wood is dry and prolonged drying time. In view of this, the present research was to establish those aspects that should be taken into consideration during the conventional drying of these two wood species. Were totally investigate all the aspects related to changes in initial and final moisture content, drying rate, changes in the wood color and defects in the wood produced before and after drying, for both species. With these tests we have developed four scientific publications, of which one has already been published in the journal "Maderas. Ciencia y Tecnología" and the rest are under review. Also we have elaborated a manual of drying for each species, which are subject to publication in the "Revista Forestal Kuru" from the Forestry Engineering Department and in the journal "Tecnología en Marcha" from the ITCR. Along with these two publications, we developed two "Brouchures" to disclose in less specialized public, such as technicians or dryers operators. Through these publications were established those criteria relevant to consider during the drying process of this two species, so as to obtain greater utilization and quality of sawn timber logs from forest plantations implemented in Costa Rica.

Keywords: wood drying, moisture content, drying defects, drying schedules, moisture control, moisture uniformity.

3. FUNDAMENTOS DEL PROYECTO O ANTECEDENTES

3.1. Objetivo General:

Establecer los criterios de secado convencional industrial para la madera aserrada de *Acacia mangium* y *Vochysia guatemalensis* provenientes de plantaciones forestales de Costa Rica.

3.2. Objetivos específicos

- Determinar las variaciones en sentido médula-corteza de las características de peso específico, contenido de humedad inicial, contracciones, coeficiente de difusión, extractivos y las características anatómicas de vasos, radios y fibras en la madera de las dos especies en estudio
- Determinar las variaciones en dirección longitudinal del contenido de humedad y densidad y la susceptibilidad de la aparición de torceduras, grietas y colapso de la madera de las dos especies en estudio.
- Determinar las variaciones del contenido de humedad final, velocidad de secado, color de la madera y defectos de secado en relación a la distancia de la médula, procedencia, tipo de corte y altura del árbol para las especies en estudio.
- Establecer los criterios para el secado de la madera de *Acacia mangium* y *Vochysia guatemalensis* cuando este debe realizarse en una cámara de secado convencional.

4. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

En el proyecto de investigación fue dividido en dos partes, durante el primer año se trabajo únicamente con la especie *Vochysia guatemalensis* y durante el segundo año con *Acacia mangium*. Se siguió la misma metodología para las dos especies.

Zona de estudio y materia prima

El estudio se realizó en dos plantaciones para *Acacia mangium* y *Vochysia guatemalensis* procedentes dos zonas diferentes del país (Región Norte y Pacífico Central, y Pacífico Norte y Atlántico, respectivamente) de 8 y 9 años de edad respectivamente. En cada plantación fueron establecidas dos parcelas circulares (452 m²) en un área representativa de la totalidad del área plantada para determinar las condiciones dasométricas de la plantación. Las condiciones dasométricas de las plantaciones pueden ser consultadas en los respectivos artículos que fueron publicados del presente proyecto (Anexos 2 y 3). En cada plantación y por cada especie se muestrearon 10 árboles. De cada árbol dos trozas de 2,5 metros fueron cortadas: la primera desde la base del árbol hasta los 2,5 metros y la segunda de 2,5 a 5,0 metros de altura del árbol.

Procesamiento de materia prima

Las trozas de cada una de las alturas fueron aserradas utilizando un patrón de corte para obtener tablas a todo lo ancho de la troza. Durante el corte se codificó e identificó la posición de la tabla en relación a la distancia de la médula. Cada tabla fue debidamente identificada y codificada en la parte inferior de la misma, según su tipo de clima (zona de procedencia), altura, la distancia de la médula, la ubicación geográfica de la tabla (norte y sur) y el número de árbol. Luego del proceso de aserrío cada tabla fue cortada transversalmente para la determinación del contenido de humedad inicial, el tipo de corte y la evaluación de la presencia de duramen y albura. Además se determinó el peso específico, los coeficientes de difusión radial y tangencial y los porcentajes de contracción radial y tangencial.

Programas de secado

Se aplicaron dos programas de secado por especie. Para el caso de *A. mangium* se trabajo con dos programas, el primero consistió en una combinación de los programas de secado T3-D2 y T8-D2 propuestos por Boone et al. (1988) que se caracterizan por usar baja temperatura y alto contenido de humedad de equilibrio, y el segundo programa, fue diseñado a partir de los resultados del primer programa. Para *V. guatemalensis* se aplicó un programa de secado denominado como T2-D4 recomendado por Boone et al. (1988), y otro diseñado a partir del primero, modificado con un mayor contenido de humedad de equilibrio dentro de la cámara. Nuevamente dichos programas pueden ser consultados en los artículos científicos publicados (Anexos 2 y 3).

Determinación del contenido de humedad y peso específico

El contenido de humedad y el peso específico fueron calculados utilizando las normas D-1442-92 y ASTM-143 respectivamente. (ASTM, 2003).

Propiedades anatómicas

La determinación de las propiedades anatómicas se realizó únicamente para *V. guatemalensis*. Se realizaron maceraciones y láminas permanentes, para la caracterización de los elementos como fibras, vasos y radios. La preparación de estos fue realizada aplicando el procedimiento propuesto por Franklin (Ruzin, 1999), procedimientos detallados ampliamente por Moya y Tomazello (2007). Se realizó una medición de 25 elementos anatómicos en concordancia con la Asociación Internacional de Anatomistas de la Madera (IAWA) para madera latifoliadas (IAWA 1989). Para las mediciones de estos elementos anatómicos se utilizó 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>).

Contenido de extractivos

Para la determinación de los extractivos presentes en la madera se procedió a extraer el aserrín resultante de la madera seca. Posteriormente de este aserrín fueron obtenidas las muestras para determinar los extractivos presentes luego de lavar la muestra en agua (solvente acuoso) y en etanol-tolueno (solvente orgánico). Para los primeros extractivos se utilizó la norma ASTM-D 1110-84 y para los segundos la norma ASTM-D 1107-96.

Determinación de propiedades de secado

El secado se llevó a cabo en horno convencional experimental marca NARDI[®] de 2 m³ de capacidad de secado. Antes de iniciar el secado cada una de las tablas se clasificó según el tipo de corte que compone la madera: en corte tangencial, corte radial, corte tangencial-radial o corte radial-tangencial-radial. En cada una de las tablas, antes de iniciar y al finalizar el secado, se evaluó la presencia de grietas, rajaduras, presencia de colapso y torceduras (arqueadura, encorvadura, acanalado, alabeo) y el color de la madera. La medición de estos, a excepción del color, se llevó a cabo siguiendo los procedimientos propuestos por Hallock y Malcolm (1972) y Milota (1996). Entre tanto que en el color fue utilizado un colorímetro marca HunterLab en su modelo miniscan. La diferencia entre los valores antes y después del secado del color como las otras propiedades defectos de la madera (grietas, rajaduras, torceduras y colapso) permitió determinar la calidad de la madera.

Diseño experimental y análisis de los datos

Los análisis estadísticos utilizados fueron de diferentes tipos, y cada uno de ellos se desarrolló de acuerdo con los datos obtenidos y lo que se quería probar. Los ensayos utilizados fueron análisis de regresión, análisis de varianza y análisis de covarianza, entre otros. Cada artículo presentado en los anexos detalla el análisis utilizado.

Elaboraciones de manual técnico y artículos científicos

De los ensayos realizados se obtuvo la información necesaria para la elaboración de un pequeño manual donde se indican aquellas consideraciones y recomendaciones necesarias en el momento del secado de la madera de *Acacia mangium* y *Vochysia guatemalensis*, el cual fue escrito con un vocabulario poco técnico y de fácil comprensión para ingenieros o técnicos de secadoras (Anexos 5 y 6). Así mismo dicha información permitió la elaboración de 4 artículos científicos.

5. PLAN DE ACCIÓN

Objetivo	Cumplimiento	Productos	Observaciones
Determinar las variaciones en sentido médula-corteza de las características de peso específico, contenido de humedad verde, contracciones, coeficiente de difusión, extractivos y las características anatómicas de vasos, radios y puntuaciones inter- y radios-vasculares en la madera de las dos especies en estudio.	95 %	Base de datos, gráficos y cuadros que muestren la variación para cada especie. Artículos científicos que muestran el comportamiento de estas propiedades (Anexo 2, 3 y 4).	<ul style="list-style-type: none"> • Con respecto a este objetivo se determinaron las variaciones médula-corteza de las características de peso específico, contenido de humedad, contracciones y coeficiente de difusión para ambas especies. • Se determinaron las características anatómicas de la especie <i>V. guatemalensis</i>. • Se realizaron dos artículos que muestran la variación del contenido de humedad y la anatomía en <i>V. guatemalensis</i> y otro de las variaciones del contenido de humedad en <i>A. mangium</i>. Estos muestran el efecto en el secado de las especies.
Determinar las variaciones en dirección longitudinal del contenido de humedad, densidad y colapso de la madera de las dos especies en estudio.	100%	Curvas que muestran la variación de las propiedades. Artículos científicos que muestran el comportamiento de estas propiedades (Anexo 2 y 3).	<ul style="list-style-type: none"> • En el planteamiento inicial se pretendía analizar toda la longitud del fuste, sin embargo con el desarrollo del proyecto se encontró que solamente en las dos primeras trozas se obtenía madera aserrada para secar. Por lo que se tomó la decisión de considerar la variación de las propiedades únicamente entre la primera y segunda troza comercial del árbol.
Determinar las variaciones del contenido de humedad final, velocidad de secado, color de la madera y defectos de secado en relación a la distancia de la médula, tipo de corte y altura del árbol para la especie en estudio	100%	Madera seca de las dos especies de estudios. Bases de datos, gráficos y/o tablas de variación de los parámetros de secado Artículos científicos que detallan el comportamiento de estas propiedades (Anexo 1, 2 y 3).	<ul style="list-style-type: none"> • En este objetivo se determinaron las variaciones del contenido de humedad final, velocidad de secado, color de la madera y defectos de secado en relación a la distancia de la médula, tipo de corte y altura del árbol para ambas especies. • Se han realizado tres artículos científicos que muestran los resultados obtenidos, uno con respecto a color y a la variación del contenido de humedad para <i>V. guatemalensis</i>; y otro con respecto a la variación del contenido de humedad, el color y los defectos en <i>A. mangium</i>.
Establecer los criterios para el secado de la madera de <i>Acacia mangium</i> y <i>Vochysia guatemalensis</i> cuando este debe realizarse en una cámara de secado convencional.	100%	Manual de secado de las especies de las dos especies en estudios (Anexos 5, 6, 7 y 8).	<ul style="list-style-type: none"> • Se adjuntan los dos manuales de secado elaborados para las especies. Uno como para presentación en revista científica y otro como "plegable"

6. PRINCIPALES RESULTADOS Y/O CONCLUSIONES OBTENIDOS

Acacia mangium:

- La especie presenta un alto contenido de humedad inicial y una alta variación, el cual es influenciado por el peso específico básico y no varía en la dirección médula-corteza o por la cantidad de albura presente en la tabla. Dicho valor es influenciado por el clima donde provienen los árboles, la posición en la altura del árbol y tipo de patrón de corte que se aplica en la troza.
- La madera *A. mangium* presenta poca uniformidad en el contenido de humedad final (9 a 52 %) luego del secado en horno convencional y es influenciado por el contenido de humedad final, el porcentaje de madera radial, el peso específico básico y la distancia relativa. No obstante, la influencia de estos factores se ven reducidos durante el secado por la altura de la troza dentro del árbol, el tipo de secado y la interacción de ambas variables.
- Uno de los principales factores que influyen en la variabilidad del contenido de humedad final es el desarrollo de bolsas de humedad durante el secado, las cuales son propensas de producirse en madera proveniente de árboles creciendo en climas tropicales muy húmedos, en secados de baja humedad relativa en la cámara y en maderas aserradas con patrones de corte combinados.
- Durante el secado de madera de *A. mangium* el duramen cambia de color y los componentes tres componentes del color son afectados por factores como clima, altura de la troza y tipo de secado, sin embargo el cambio de color se produjo por tipo de secado aplicado en la madera y el tipo de clima donde crece el árbol.
- Los defectos de secado y contracciones en *A. mangium* son catalogados como nulos o leves, con excepción de las encorvaduras y arqueaduras las cuales tienden a ser severos. Defectos como alabeo, encorvadura, acanaladura y la contracción en acho de la tabla no fueron afectados por el tipo de secado aplicado, si no que fueron afectados por otros factores como el clima donde se desarrolla el árbol, el patrón de corte y los contenidos de humedad. En tanto que los defectos de arqueadura

rajaduras, grietas y contracciones en espesor si fueron afectados por el secado, no obstante el tipo de secado no ejerció influencia en el desarrollo de estos. Así mismo las contracciones que sufre la madera aserrada durante el secado no se ven influenciadas por el tipo de secado que se le aplica a la madera.

Vochysia guatemalensis:

- La especie posee un contenido de humedad inicial alto (alrededor de 150%), con coeficientes de variación del 40% en plantaciones jóvenes de 8 años. A diferencia de otras especies, el contenido de humedad inicial no presenta variación con la distancia de la médula, pero en altura sí existe diferencia, las trozas de la base son más húmedas que la parte superior de la troza. Así mismo, el tipo de clima y la presencia de duramen produce árboles con diferencias en el contenido de humedad. En el clima seco es mayor el contenido de humedad que en la madera de clima húmedo. Así mismo en piezas con presencia de duramen, el contenido de humedad inicial alcanza en promedio 225%, a diferencia de la madera de albura que presenta un promedio más bajo de 150%.
- La variación del contenido de humedad final es alta después del secado, con valores que varían entre 10 y 24%, siendo los valores más altos, los que están más próximos a la médula, en aquella madera con presencia de cortes orientados radialmente (radial, central y combinado) y cuando hay presencia de madera de duramen. El programa de secado aplicado, también produce variación del contenido de humedad final de la madera. La menor variación del contenido de humedad final se produce al secar más lentamente la madera, y se logra tener un contenido de humedad próximo al deseado.
- La variación del color de la madera en estado verde, está relacionado por la presencia de albura y duramen; no obstante, en ambos tipos de madera la variaciones en el índice de luminosidad gobiernan los cambios de color en la condición verde. El color, luego del proceso de secado, también está gobernado por los cambios en los índices de luminosidad; sin embargo, otros factores están influyendo como el tipo de secado aplicado y la procedencia de la madera. Luego del secado, la madera de albura y

duramen de *V. guatemalensis* se torna ligeramente más clara comparado con los colores que poseía antes del secado.

7. GESTIÓN DEL PROYECTO E INCONVENIENTES

Este proyecto involucró cinco giras, con el fin de recolectar el material para realizar los ensayos. Como suele suceder los efectos climáticos fueron los principales problemas para realizar esta actividad.

Así mismo al iniciar el proyecto de investigación, durante los primeros tres meses hubo problemas con la incorporación de una investigadora que estaba originalmente planteada y que no fue posible incorporar. Esto provocó que todas las actividades se concentraran en los únicos dos investigadores participantes (Ing. Tenorio e Ing. Moya)

Debido a que algunos de los ensayos son sumamente largos y al poco tiempo que tuvimos por la falta de un investigador, no se pudo efectuar el estudio de las propiedades anatómicas de la madera *A. mangium*.

8. APORTE DE INFRAESTRUCTURA: DOCENCIA DEL CENTRO O LA ESCUELA

1. **Mantenimiento y reparación del vehículo FORD** placa # 265-107, utilizado durante el desarrollo del proyecto, así mismo como el combustible para otros vehículos.
2. **Mantenimiento en la secadora experimental NARDI**

9. DIVULGACIÓN DE RESULTADOS

Fueron generados diferentes artículos científicos para ser publicados en revistas indexadas y dos manuales para publicar uno en la revista de nuestra escuela y el otro en la Revista Tecnología en Marcha del ITCR (estas publicaciones están dirigidas a públicos muy especializados). Además con el fin de divulgar la información a técnicos de secadoras, los manuales se confeccionaron también como “plegables”.

9.1 Artículos científicos:

1. Aguilar-Tovar, D; Moya, R; Tenorio, C. 2009. Wood color variation in undried and kiln-dried plantation-grown lumber of *Vochysia guatemalensis*. Maderas. Ciencia y Tecnología 11 (3): 207-216. (Anexo 1)
2. Moya, R; Aguilar, D; Tenorio, C; Bond, B. 2011. Variation of moisture content in kiln dried plantation grown lumber of *Vochysia guatemalensis*. Wood fiber and science (Sometido). (Anexo 2)
3. Tenorio, C; Moya, R. 2010. Factores de variación del contenido de humedad, color y defectos en la madera de *Acacia mangium* (Willd) antes y después del secado. Drying Technology (A someter). (Anexo 3)
4. Tenorio, C; Moya, R. 2010. Influencia de la anatomía en el contenido de humedad, las contracciones y en los defectos en madera aserrada de *Vochysia guatemalensis* antes y después del secado. Maderas. Ciencia y Tecnología (A someter). (Anexo 4)
5. Moya, R; Tenorio, C; Aguilar-Tovar, D. 2010. Algunos aspectos a considerar para el secado convencional de la madera de *Vochysia guatemalensis* Donn Sm. (cebo/mayo). Revista Forestal Kurú. (Sometido). (Anexo 5)
6. Tenorio, C; Moya, R. 2010. Consideraciones y recomendaciones prácticas para mejorar la calidad de la madera seca de *Acacia mangium* Willd. Tecnología en Marcha. (Sometido). (Anexo 6)

9.2. Plegables de divulgación

1. Guía práctica #4: Algunos aspectos a considerar para el secado convencional de la madera de *Vochysia guatemalensis*. (Anexo 7)

9.3. Divulgación externa internacional

1. Ponencia en Uruguay: "Influencia de los factores que afectan el contenido de humedad en *Acacia mangium* antes y después del secado". Seminario Tecnología y Caracterización de la Madera. 5 al 9 de julio. Centro de Formación de la Cooperación Española en Montevideo. Montevideo – Uruguay.

9.2. Tesis llevadas a cabo

Tema	Escuela	Grado	Año
1. Aguilar, D. 2009. Fuentes de variación en el contenido de humedad inicial y final y el cambio de color, antes y después del secado, de la madera de <i>Vochysia guatemalensis</i> proveniente de una zona húmeda y seca de Costa Rica.	Forestal-Colombia	Lic.	2009
2. Tenorio, C. 2010. Factores de variación del contenido de humedad, color y defectos en la madera de <i>Acacia mangium</i> (Willd) antes y después del secado.	Forestal	Lic.	2010

10. AGRADECIMIENTOS

Los investigadores de este proyecto dan las gracias a las siguientes personas, organizaciones y empresas: Ing. Rafael Córdoba, por sus aportes y comentarios acertados sobre el tema de secado de madera. A los funcionarios del Centro de Investigación en Integración Bosque Industria (CIIBI) por su trabajo en el aserrío de las trozas y en la ejecución de los ensayos, a la Unidad de transportes del ITCR. A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por el financiamiento del proyecto. A las empresas, Maderas Preciosas de Costa Rica (MACORI), a la Escuela de Agricultura de la Región del Trópico Húmedo (EARTH) y a la Empresa Ganadera Barsa S.A., por la donación de los árboles de acacia y cebo utilizados en este proyecto.

11. ANEXOS Se adjuntan todos los artículos científicos, notas técnicas, plegable informativo, y demás información pertinente.

Anexo 1: Artículo científico: Aguilar-Tovar, D; Moya, R; Tenorio, C. 2009. Wood color variation in undried and kiln-dried plantation-grown lumber of *Vochysia guatemalensis*. Maderas. Ciencia y Tecnología 11 (3): 207-216.

**Wood color variation in undried and kiln-dried plantation-grown lumber of
*Vochysia guatemalensis***

Variación del color de la madera aserrada en estado verde y seca al horno de Vochysia guatemalensis proveniente de plantaciones de rápido crecimiento

Diana Aguilar-Tovar¹, Róger Moya², Carolina Tenorio²

¹Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Forestal, B. Santa Helena A.A. 546 - Ibagué, Colombia.

²Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica.

Corresponding author: rmoya@itcr.ac.cr

Received: September 14, 2009.

ABSTRACT

Vochysia guatemalensis has been planted over large tropical areas to obtain lumber products. However, compared with naturally-grown material variations in wood color have been noted. In the current research, trees from two 8-year-old fast-grown plantations were sampled from different climatic conditions in order to identify the causes of color variation. The study evaluated the heartwood presence, grain pattern, distance from pith, height within the tree, and effect of drying schedules. The wood color was measured by CIEL*a*b* systems.

Wood color of *Vochysia guatemalensis* is a combination of different tonalities of lightness (L*), redness (a*), and yellowness (b*), however, the lightness and yellowness components were the dominant tones. The color of heartwood and sapwood were different before and after drying. A negative relationship was found between a* and L*, and a* and b* in the undried

state, but no relationship was found between L^* and b^* . The L^* index is only correlated with heartwood presence in undried wood. In dried wood, only a relationship between a^* and L^* is maintained, while other color parameters were affected by climate, drying schedule and heartwood presence, the L^* parameter being the most affected. The dried wood displays a lighter surface than the wood before drying. The variations in the dried wood suggest that it is useful to establish dried lots of lumber according to the drying schedule, source and presence of sapwood and heartwood.

Keywords: fast growth plantations, tropical species, CIElab color systems, wood quality.

RESUMEN

La especie *Vochysia guatemalensis* ha sido plantada sobre largas áreas en regiones tropicales. Así mismo, han sido observadas grandes variaciones del color de su madera. En la investigación fueron muestreadas plantaciones de 8 años de edad en diferentes condiciones de clima con el fin de establecer las causas de variación de la madera. Fueron evaluadas la presencia de duramen, el patrón de aserrío, la distancia de la medula y el programa de secado. El color fue medido por el sistema CIELab.

Fue encontrado que la madera de *V. guatemalensis* presenta una combinación de tonalidades de claros (L^*), rojos (a^*) y amarillos (b^*), siendo los colores claros y amarillos los tonos dominantes. El color del duramen y la albura fueron diferentes antes y después del secado. Una negativa correlación entre a^* y L^* , y a^* y b^* fue encontrada, pero ninguna correlación fue observada entre L^* y b^* . El índice L^* fue el único parámetro correlacionado con el duramen en madera verde. En la madera seca, solamente se mantuvo la relación a^* y L^* , mientras que los parámetros del color fueron afectados por el clima, programa de secado y duramen, siendo

L* el más afectado. La madera seca presentó una superficie más clara que la madera antes del secado. Las variaciones en madera seca sugieren la conveniencia de establecer lotes de secado de acuerdo al programa de secado aplicado, procedencia y presencia de albura y duramen.

Palabras claves: rápido crecimiento, especies tropicales, CIElab, calidad de madera.

INTRODUCTION

Vochysia guatemalensis, is the most important native species among fast-growth plantations in Costa Rica. It has high productivity, ability to be grown on abandoned areas, agroforestry and silvopastoral systems. These factors are promoting reforestation of the country with native species (Montagnini 2007, Calvo-Alvarado *et al.* 2007). However, lumber produced from thinnings and clear-cut trees of fast-growth plantations has been found to have major wood color variation (Moya *et al.* 2008).

Wood color is an important deciding wood characteristic for many uses, such as furniture and decorative veneers and is considered to be an important attribute for marketing (Janin *et al.* 2001). Möttönen *et al.* (2002) noted that wood characteristics and uniformity of wood color played an important role in establishing lumber prices. Moya *et al.* (2009) mentioned that the color of sapwood is white and that of heartwood is light reddish in *V. guatemalensis* lumber, but they did not discuss wood color variation within or between boards, or its variation with others factors.

One of the most accurate and commonly used systems for measuring wood color is the CIELab color system. According to HUNTER LAB (1995), the CIELab color system estimates the wood color in three coordinates: L* for lightness, represents the position on the black–white axis (L=0 for black, L=100 for white); a* for chrome value, defines the position on the red–green axis (+100 values for red shades, -100 values for green shades); and b* for chroma value, defines the position of the yellow–blue axis (+100 values for yellow shades, -100 values for blue shades).

Due to lack of information to explain the causes for the variations of wood color of *V. guatemalensis* lumber, this research examined wood color measured by CIE Lab color systems in relation to climatic conditions, position in stem height and distance from the pith, saw pattern (tangential and radial sawn), heartwood or sapwood presence, and kiln drying schedules. On the basis of this knowledge, we can explain wood color variation in dried wood and possibly improve lumber quality for marking

METHODS AND MATERIAL

Geographic position and characteristics of plantation

Trees from two 8-year-old fast-grown plantations were chosen to study the influence of drying on lumber characteristics. One plantation was located in a Northern region of Costa Rica, with a tropical dry climate, where typical conditions are temperatures from 21 and 31 °C, precipitation of 1620 mm per year, and a dry season extending from November to May. It was planted by Precious Woods S.A. (MACORI) Company. The second plantation was located in a tropical wet climate zone, with temperature from 20 to 25 °C, average precipitation of 2953 mm, and with a short dry season, extending from February to March. It was planted by the Escuela de Agricultura de la Región del Trópico Húmedo (EARTH). The plantation characteristics are detailed in Table 1.

Table 1. Plantation characteristics of fast-growth plantation of *V. guatemalensis*

Climatic condition	Tree age (years)	Plantation stocking (n/ha)	Diameter breast (cm)	Tree height (m)	Volume (m ³ /ha)
Dry tropical	8	464	26.0	18.5	215.3

Wet tropical	8	486	26.3	17.8	212.3
--------------	---	-----	------	------	-------

Sampled trees

Ten representative trees from each plantation were harvested as a second thinning of the test stands (Petit and Montagnini 2006). All harvested trees were comparable in average DBH, a straight bole, normal branching, and absence of pests or diseases. North orientation was marked on each tree prior to harvesting and then marked on each log. From each selected tree, two 2.5 m logs were obtained, one from the tree base (lower log) and the other from a 2.5 to 5.0 m height (upper log). Each log was end-coated to retard drying and reduce end splits. All logs were transported without delay to the sawmill of the Instituto Tecnológico de Costa Rica. Logs were sawn using a pattern designed to produce 25mm thick boards with the saw patterns being those different orthotropic directions commonly used in Costa Rica to obtain wood for the furniture industry. The boards from the north-facing side of each log were separated from those facing to the south. An edger was used to remove the bark. Each board was properly identified by climatic condition, height, pith, location geographic position, and tree number. In total, from all of the logs 258 boards were obtained. However some boards were split for pith presence or fungal attack which meant only 247 boards were finally used in the study.

Drying process and moisture content determination

Two kiln drying schedules were used to dry the lumber to 10% MC. “A” refers to schedule T2-D4 (Table 2) proposed by Boone *et al.* (1988), for wood from natural forest, and it was named “fast drying”. The second schedule (Table 2) used higher equilibrium moisture contents in all drying steps. It was slower than T2-D4 schedule, and was named “slow-drying”. Total drying times were 150 hours for the fast-drying schedule and 227 hours for the slow-drying one. 112

boards from the north-facing side of each log were used in fast-drying (FD) and 112 boards in slow drying (SD). Moisture content was determined before and after drying, following the ASTM D1442-92 (ASTM 2003) standard.

Table 2. Kiln schedules used for drying *Vochysia guatemalensis*

Step	Fast-drying*			Slow-drying		
	Td ° C	EMC %	RH %	Td ° C	EMC %	RH %
Heating	35	14.8	-	35	18.0	-
Drying	38	14.3	50	38	17.0	82
	38	11.9	45	38	15.0	79
	38	11.9	35	38	13.0	74
	43	10.5	30	44	11.0	69
	44	7.6	30	44	9.0	55
	49	5.5	25	49	7.0	42
	55	4.0	20	55	5.0	31
	66	3.2	15	66	3.2	21
	66	3.2	12	66	3.2	21
Equalization	66	3.2	12	66	3.2	21
Conditioning	60	3.5	-	60	3.5	-
Cooling	30	3.5	-	30	3.5	-

*Dryings schedules from Boone *et al.* (1988).

Legend: Td= Dry-bulb temperature, EMC= equilibrium moisture content, RH=relative humidity.

Wood color determination

Colour was measured using a portable Miniscan XE plus colorimeter (HUNTER LAB) in each board before and after drying. The colorimeter was re-calibrated each time before use, with a white standard probe supplied by HUNTER LAB. The reflectance spectra were recorded using the standardized CIEL*a*b* chromaticity system as a function of wavelength (BYK-Gardner 2004). The measurement was within the visible range of 400–700 nm at intervals of 10 nm with a measuring aperture of 11 mm. For reflection readings, the observer component was set at an angle of 90° with the surface of the specimen. The standard illuminant D65 (corresponding to

daylight at 6500 K) was used as the color space measuring and computing parameter. Two measurements along the boards were taken, and average values were obtained for L^* , a^* and b^* . Each measurement was identified as being taken from either heartwood or sapwood.

Statistical Analysis

Before analysis of variance (ANOVA) and other statistical analyses, it was necessary to confirm the assumptions of normality and homogeneity of variance. The UNIVARIATE procedure of SAS System for Windows release 8.1 (SAS Institute Inc., Cary, N.C.) was used to test the assumptions for analysis of variance. Pearson correlation coefficients were computed to analyze the relationships between color coordinates and tree height, climatic type, grain pattern, distance to pith, and heartwood percentage in wood color analysis. Regression analysis was used to determine the relationships of color coordinates ($L^*a^*b^*$) before and after drying, for sapwood and heartwood. SAS (SAS Institute Inc.) and STATISTICA 6.0 (Statsoft Inc.) software were used for the statistical computations.

RESULTS AND DISCUSSION

Wood color difference between sapwood and heartwood

The average colorimetry results in sapwood and heartwood of *V. guatemalensis* in CIEL $^*a^*b^*$ color systems are shown in Table 3. All color parameters are positive, meaning that wood color of this species is a combination of different tonalities of lightness, redness, and yellowness. However, the lightness and yellowness components are the highest proportions in both types of wood. The color of heartwood and sapwood are different before and after drying. Sapwood color averages 73.5 in L^* , 6.3 in a^* and 68.1 in b^* and heartwood color averages 68.1, 5.8 and 22.1, respectively before drying. ANOVA analysis shows lightness and yellowish parameters

of sapwood are higher than in heartwood, but no difference was found in redness color parameters before drying. After drying, L* parameters averaged 70.9 in sapwood and 70.7 in heartwood, a* averaged 6.7 in heartwood and 5.8 in sapwood, and finally, b* averaged 22.3 in heartwood and 20.6 in sapwood. Statistical analysis determined that L* was not different between heartwood and sapwood, but the a* and b* parameters were significantly higher in heartwood. Gierlinger *et al.* (2004) mentioned that change in color between sapwood and heartwood is due to the synthesis and accumulation of extractives during heartwood formation. Heartwood color is in part due to oxidation and polymerization reactions that take place as wood ages.

On the other hand, the variations of wood color parameters (measured by coefficients of variance) were similar before and after drying (Table 3). Variation in the a* parameter is the highest (over 23.8%), and the smallest variation (minor than 8%) occurred in L* parameter, both in sapwood and heartwood before and after drying. The coefficients of variation of b* ranged from 7.8% to 15.3% (Table 3). The color of wood is related to the presence of extractives and the chemical composition of lignin in some species (Gierlinger *et al.* 2004). The variation in extractives content or composition produced by different soil properties or different growing conditions can explain wood color variation of heartwood and sapwood (Lui *et al.* 2005). For example, redness (a*) and lightness (L*) are correlated with extractive content, while yellowness is primarily related to the photochemistry of the major chemical components of wood, especially lignin (Gierlinger *et al.* 2004).

Moya *et al.* (2009) studied wood color of lumber from fast-growth plantation of *V. guatemalensis* and they mentioned that wood color is basically white for sapwood and light red

or reddish for heartwood, according to the Munsell Soil Color Charts (Mac Corporation 1994). Wood color measured with CIE L*a*b* color systems confirmed that high lightness (L*) and yellowness (b*) levels and low redness level (a*) are typical of sapwood, and these parameters establish the white color in sapwood of *V. guatemalensis*. But a decrease in lightness and yellowness level increases reddish color of heartwood, before and after drying.

Table 3. Color parameters of *V. guatemalensis* before and after drying, measured with the CIE L*a*b* system.

Wood	Conduction	L* (lightness)	a* (redness)	b* (yellowness)
Sapwood (N=165)	Before	73.5 (5.8) and (7.9)	6.3 (1.6) and (25.3)	68.1 (5.3) and (7.8)
	After	70.9 (5.7) and (8.0)	5.8 (1.6) and (27.3)	20.6 (2.6) and (12.6)
Heartwood (N=60)	Before	68.1 (5.3) and (7.8)	6.9 (1.9) and (23.4)	22.1 (2.7) and (12.6)
	After	70.7 (4.5) and (6.4)	6.7 (1.5) and (23.8)	22.3 (3.0) and (15.3)

Note: the values in parenthesis standard deviations and coefficients of variation respectively and N= samples numbers

Relation between wood color coordinates

There is a negative relationship between a* and L* parameters in sapwood and heartwood, for both undried and dry lumber (Figure 1a and 1b). No significant relationship was found between L* and b* in undried wood (Figure 1c), but a significant relationship between a* and b* (Figure 1e) in undried lumber was found but with a weak relations (R^2 between 10% and 20%). These relationships are not found in dried wood (Figure 1d and 1f). These results suggest that when lightness (L*) increases, redness decreases (a*), and that other sources not considered in

this study may influence the relation between a^* and b^* , such as variation of quality or quantity of extractives (Keey 2005).

Nishino *et al.* (1998) and Moya and Berrocal (2009) measured the correlations between different color parameters of many tropical species from Guiana and *Tectona grandis*, respectively. They showed that only L^* and a^* parameters were correlated, but no relationship was established between b^* and L^* , or between a^* and b^* . Their results differed from the current results for *V. guatemalensis*. The results regarding a relationship between wood color parameters in *Fagus sylvatica* (Liu *et al.* 2005) agreed with the current results for undried condition, but not for dry lumber. It was found that the parameters of the CIEL*a*b* color system were significantly correlated (L^* with a^* , L^* with b^* , and a^* with b^*). The relationships between color parameters varied within species, indicating that this relationships depends others factors, such extractives composition. Some extractives precursors of the wood color are located in some species, but they not presents in others species, affecting the relationships of wood color.

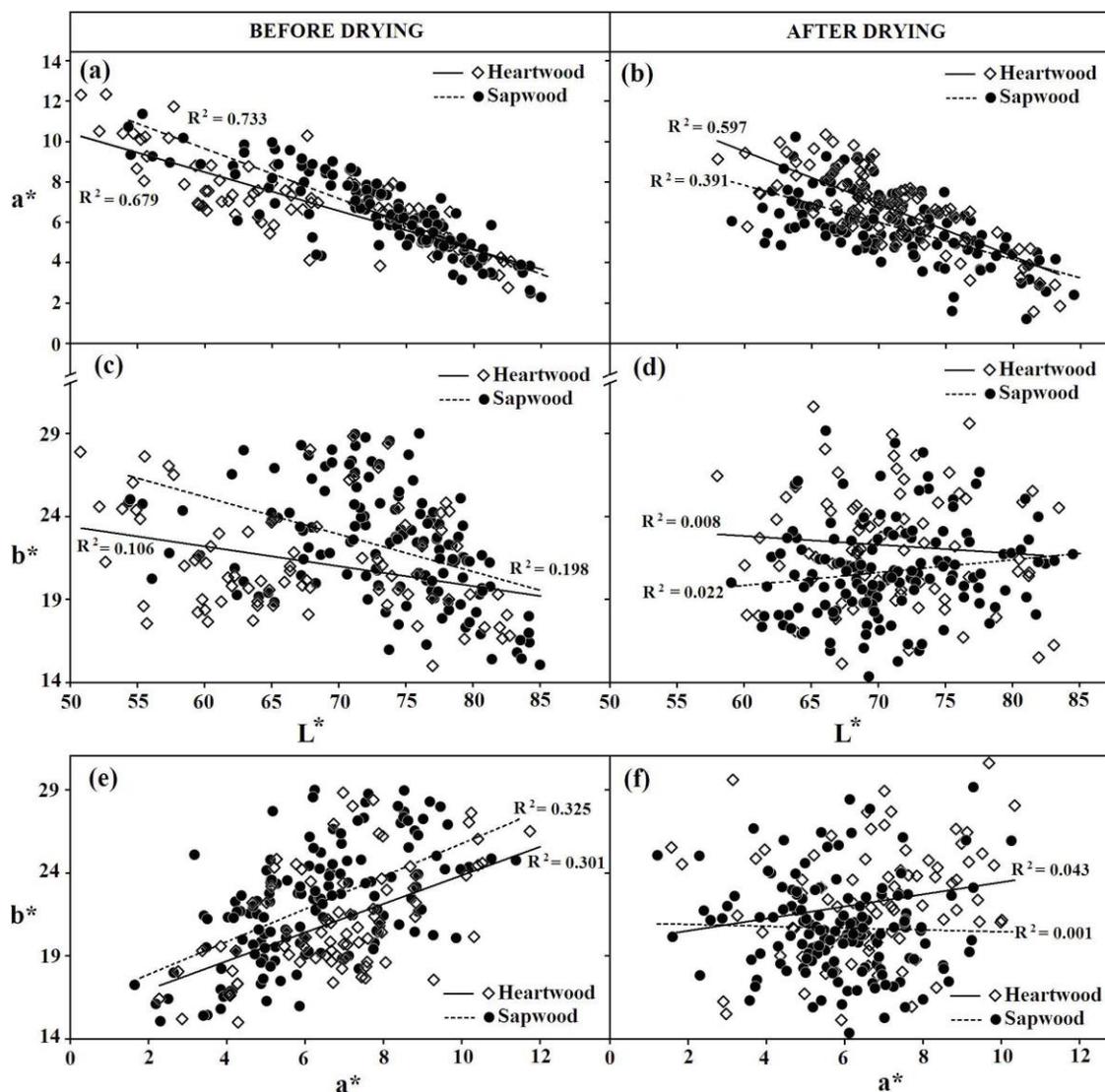


Figure 1. Relationships between wood color parameters lumber of *Vochysia guatemalensis* before and after drying.

Wood color difference before and after drying

It was found that sapwood and heartwood lumber color were different before and after drying.

All color parameters decreased slightly in sapwood but only L^* coordinates increased significantly after drying in heartwood (Figure 2). The ΔE^* parameter, which measures color difference between two points in a Cartesian plane, was 7.7 and 8.3 in sapwood and heartwood, respectively. When, ΔE^* is greater than 2, the human eye can detect wood color variation

(Gonnet 1993). Therefore, there is a visually perceptible difference between before and after the drying process. According to these results, dry lumber with sapwood reaches a less pale yellow or less white than in a undried condition because lightness (L^*), redness (a^*) and yellowness index (b^*) decrease; but heartwood decreased its redness for decreasing redness parameters (a^*) and increasing yellowness parameters (b^*). Therefore, after drying there is a decrease in wood color difference between sapwood and heartwood.

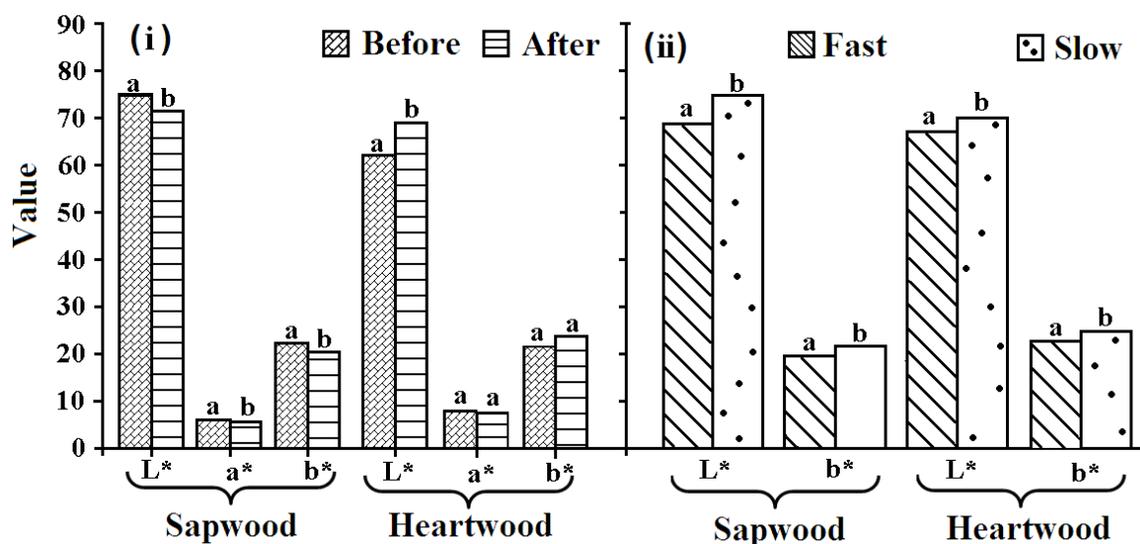


Figure 2. Variation of wood color parameters before and after drying (i), and as a result of different drying schedules in sapwood and heartwood (ii).

Keyy (2005) mentioned that superficial changes in color of boards after drying are produced by water movement and movement of dissolved substances from the interior to the surface. Substances are dissolved in water, then water in the surface is evaporated and wood extractives are concentrated at or near the surface. Sugars of low-molecular weight and nitrogenous compounds such as proteins produce a reddish color. However, wood color change can occur only on surface areas in many species (Sundvist 2002).

Sources of wood color variation

The lightness index (L^*) was the only parameter of wood color affected statistically before drying. As was discussed previously, sapwood and heartwood color are different (Table 4). But other factors had a statistically significant affect on wood color parameters in dry lumber. The L^* parameter was negatively affected by heartwood presence, type of drying schedule, and variation in the final moisture content (Table 4). The a^* parameter was also significantly affected by final moisture content (Table 4) and b^* was affected by climate condition where the tree growing and by the type of drying schedule.

According to these results, slow drying produces lower L^* and a^* values than fast drying (Figure 2b), thus resulting in grayer wood (increasing L^* and b^* parameters). On the other hand, boards from trees growing in dry sites in Costa Rica produce wood color with less yellow (increasing b^* component) than wood from wet locations. Finally, ANOVA analysis showed that color difference from undried to after drying, as measured by ΔE^* index, did not have any relationship with the variables studied (Table 4). This means that change of wood color (ie lightness) in lumber of *V. guatemalensis* will occurs when lumber is kiln dried, regardless of any condition of growing, drying schedule, or position from within the tree.

Table 4. Pearson correlation coefficient between wood color of *V. guatemalensis* before and after drying process.

Source of variation	Before drying			After drying		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
Climatic condition	0.13	0.02	0.05	-0.04	-0.07	-0.36*
Part of tree	0.16	-0.11	0.02	0.12	-0.22	-0.06
Distance from pith	0.14	-0.09	0.14	0.07	-0.16	-0.06
Type of drying	0.07	0.05	-0.25	-0.45**	0.24	-0.38**
Grain pattern	-0.18	0.09	-0.09	0.05	0.14	0.09
Heartwood presence	-0.35*	0.19	-0.12	-0.42**	0.32	0.25*
MCI	-0.26	0.13	-0.11	-0.15	0.22	0.23
MCI	-0.14	0.15	-0.24	-0.29*	0.29*	-0.18

Legend: * Statistically significant at $\alpha=0.05$, ** Statistically significant at $\alpha=0.01$.

Wood color variation after drying in *V. guatemalensis* can be caused by migration of different color precursors, such as phenol extractives (Kreber and Haslett 1998). The intensity of this variation is influenced by dry bulb temperature, air velocity, and relative humidity inside the kiln (Stenudd 2004, Rappold and Smith 2004). We did not determined quality and quantity of extractives of surface of lumber of *V. guatemalensis* , however a determination can help to explain the wood color performance

Conclusions

Undried wood color of *Vochysia guatemalensis* is a combination of different tonalities of lightness, redness, and yellowness. However, the lightness and yellowness components are the most prevalent tones in both heartwood and sapwood . Dried lumber color in heartwood and sapwood is different than after drying. All color parameters were different after dryings, excepts in a* and b* parameters of heartwood. .

There was a negative relationship between a* and L* parameters in undried and dried lumber for both sapwood and heartwood, and now relationship was found between L* and b*; but there was a relationship between a* and b* in undried lumber. However, these relationships are not found in kiln dried wood. These results suggest that an increase of lightness is associated with a decrease redness (a*), that other sources not considered in this study may influence the relation between a* and b*.

Lightness index (L^*) is only correlated with the presence of sapwood or heartwood in the undried condition, but other wood color parameters were not correlated with any other factors studied. After drying, the wood color varies according to the climate conditions where the tree grew, drying schedule applied, and the presence of heartwood. The L^* color parameter is the factor most affected. Drying in *V. guatemalensis* wood produces a lighter surface than before drying. Therefore, dry surface is lighter than undried surface. According with this results, the color in dried lumber will produced for its precedence, drying schedule or sapwood/heartwood, therefore we can established color class for different end-users.

Acknowledgements

The authors wish to thank Escuela de Agricultura de Trópico Húmedo (EARTH) and Maderas Preciosas de Costa Rica (MACORI) for raw materials and facilities for the study. We thank the Vicerrectoría de Investigación y Extensión at the Instituto Tecnológico de Costa Rica for financial support.

References

- ASTM (American Society for Testing and Materials, US), 2003. ASTM D-1442-92, Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurements of Wood and Wood-Base Materials (Reproved 2003).
- BOONE, R.S.; KOZLIK, C.J.; BOIS, P.J.; WENGERT, E.M. 1988. Dry kiln schedules for commercial woods-temperate and tropical. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-57. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin U.S.
- BYK-GARDNER L. 2004. CIE $L^*a^*b^*$ system. Color-guide 45/0 operating instructions, MD, USA.

- CALVO-ALVARADO, J.C.; ARIAS, D.; RITCHER, D.D. 2007. Early growth performance of native and introduced fast growing tree species in wet to sub-humid climates of the Southern region of Costa Rica. *Forest Ecology Management* 242: 227-235
- GIERLINGER, N.; JACQUES, D.; GRADNER, M.; WIMMER, R.; SCHWANNINGER M.; ROZENBERG, P.; PÂQUES L.E. 2004. Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. *Trees* 18: 102-108
- GONNET, J.F. 1993. CIELab measurement, a precise communication in over colour: an example with carnation (*Dianthus caryophyllus*) cultivars. *Journal Horticulture Science* 68: 499-510
- HUNTERLAB, 1995. Use measurement of appearance. A welly-Interscience publication, Welly and Sond, New York.
- JANIN, G.; GONCALEZ, J.; ANANIAS, R.; CHARRIER, B.; FERNANDES, G.; DILEM, A. 2001. Aesthetics appreciation of wood colour and patterns by colorimetry. Part 1. Colorimetry theory for the CIELab Sistem. *Maderas. Ciencia y tecnología* 3: 3-13
- KEEY, R. 2005. Colour development on drying. *Maderas. Ciencia y tecnología* 7:3-16
- KREBER, B.; HASLETT, A.N. 1997. A study of some factors promoting kiln brown-stain formation in radiate pine. *Holz als Rush Werk* 55: 355-362
- LIU, S.; LOUP, C.; GRIL, J.; DUMONCEAUD, O.; THIBAUT, A.; THIBAUT, B. 2005. Studies on European beech (*Fagus sylvatica* L.). Part 1: Variations of wood color parameters. *Annals Forest Science* 62: 625-632
- MAC CORPORATION. 1994. Munsell soil color charts. Macbeth Division of Kollmorgen Instruments Corporation. New York, US.

- MONTAGNINI, F. 2007. Management for Sustainability and Restoration of Degraded Pastures in the Neotropics. In: Post-Agricultural Succession in the Neotropics. Ed. Wyster, R. Springer Verlag, New York
- MÖTTÖNEN, K.; ALVILA, L.; PAKKANEN, T. 2002. CIELab Measurements to determine the role of felling season, log storage and kiln drying on coloration of silver Birch wood. *Scandinavian Journal Forest Research* 17: 179-191
- MOYA, R., LEANDRO, L., MURILLO, O. 2009. Wood characteristics of *Terminalia amazonia*, *Vochysia guatemalensis* and *Hyeronima alchorneoides* planted in Costa Rica. *Bosque* 30(2):78-87
- MOYA, R.; BERROCAL, A. 2009. Wood colour variation in sapwood and heartwood of young trees of *Tectona grandis* and its relationship with plantation characteristics, site, and decay resistance. *Annals Forest Science* (accepted)
- MOYA, R.; URUEÑA, E.; MUÑOZ, F. 2008. Modulation of moisture content in conventional kiln of wood from fast-growing tropical species in plantation. CD. SWST, L. (ed). Proceedings SWST Annual Meeting. 10-12 de noviembre de 2008. Concepción – Chile.
- NISHINO, Y.; JANIN, G.; CHANSON, B.; DÉTIENNE, P.; GRIL, J.; THIBAUT, B. 1998. Colorimetry of wood specimens from French Guiana. *Journal Wood Science* 44:3-8
- MOYA, R.; LEANDRO, L.; MURILLO, O. 2009. Wood characteristics of *Terminalia amazonia*, *Vochysia guatemalensis* and *Hyeronima alchorneoides* planted in Costa Rica. *Bosque* 30: 78-87
- PETIT, B.; MONTAGNINI, F. 2006. Growth in pure and mixed plantations of tree species used in reforesting rural areas of the humid region of Costa Rica, Central America. *Forest Ecology and Management* 233: 338-343

- RAPPOLD, P.; SMITH, W. 2004. An investigation of the relationships between harvest season, log age, and drying schedule on the coloration of hard maple lumber. *Forest Products Journal* 54: 178-184
- STENUDD, S. 2004. Color response in silver birch during kiln-drying. *Forest Products Journal* 54(6): 31-36
- SUNDQVIST, B. 2002. Wood color control during kiln-drying. *Forest Products Journal* 52(2): 30-37

Anexo 2: Artículo científico Moya, R; Aguilar, D; Tenorio, C; Bond, B. 2011. Variation of moisture content in kiln dried plantation grown lumber of *Vochysia guatemalensis*. Wood Fiber and Science (Sometido).

**Variation of moisture content in kiln dried plantation grown lumber of
*Vochysia guatemalensis***

Róger Moya*

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: rmoya@itcr.ac.cr

Diana Aguilar Tovar

Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Forestal, B. Santa Helena A.A. 546 - Ibagué, COLOMBIA, e-mail: dimagui5@hotmail.com

Carolina Tenorio

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: ctenorio@itcr.a.cr

Brian Bond

Department of Wood Science and Forest Products,
Virginia Tech. Blacksburg, Virginia, United States

*Corresponding author

Summary

Vochysia guatemalensis is widely planted over large areas of tropical Latin America. However, large variation in the final moisture content (MCf) is found after drying. In this research, the causes for the unevenness of moisture content (initial and final) were studied. Wood from two 8-year old fast growth plantations was sampled from different climatic conditions (dry and wet tropical). The presence of heartwood, grain pattern, distance from pith and height of tree were also investigated.

The results shown that initial moisture contents (MCi) ranged from 98% to 281%, and final moisture contents ranged from 10 % and 24%. The variation in MCi was attributed to climatic conditions, presence of heartwood and position of a board in a tree. Meanwhile, the highest values and large variation were produced by boards near to pith, with quarter-sawn pattern, and that had heartwood and wet pocket. The slow drying schedule decreased the MCf variation.

Keywords: fast growth plantations, tropical species, wood quality, wet pocket.

Introduction

Vochysia guatemalensis, is the most important native species in fast-growth plantation in Costa Rica. It has high productivity, ability to grown on abandoned areas, agroforestry and silvopastoral systems. These are very encouraging factors promoting at present the reforestation with native species in the country (Montagnini, 2007; Calvo-Alvarado et al., 2007). However, lumber from thinning and clear-cut trees of fast-growth plantation has been found with severe drying defects and a lack of uniformity in the final moisture content (MCf). Moya et al. (2008) found that fast grown *V. guatemalensis* was from Costa Rica developed more bow, cup, check, honeycomb, collapse and split in dried lumber compared with others fast-growth plantation

(Moya et al., 2008). Others research had demonstrated that its initial moisture content (MCi) is over 170% (Moya et al., 2009; Moya and Muñoz, 2009). Boone et al (1988) recommended schedule T2-D4 in 2.5 cm-thick lumber for drying of *V. guatemalensis* from native trees and it had been applied for lumber from fast-growth trees (Moya et al., 2008).

Drying is an important process in manufacturing for it contributes to dimensional stability, compatibility of coatings and adhesives, improvement of workability, thermal, acoustic and electrical insulation and also increases mechanical and biodegradation resistance (Gu et al., 2004). Appropriate drying decreases drying defects and uniformity in MCf (Forest Products Laboratory, 1999). However, variability of MCf is still found in dried lumber. Literature reports suggest that the variation is related to drying schedules (Gu et al., 2004), physical and chemical properties (Möttönen, 2006), different MCi (Moya and Muñoz, 2008; Ofori y Brentuo, 2005), wood anatomy (Moya and Muñoz, 2008), position of lumber in the trees (Ofori and Brentuo, 2005), drying condition (Gu et al., 2004), wetwood presence (Ward and Pong, 1980), harvest season (Möttönen, 2006) and climatic condition (Luostarinen and Möttönen, 2004).

Due to lack of information to explain the causes for the variations of MCi and MCf of *V. guatemalensis* lumber after kiln drying, this research examined the occurrence and variation of these quality parameters in relation to climatic conditions, position in height and pith distance, saw pattern (tangential and radial), heartwood or sapwood presence and drying schedules. On the basis of this knowledge, we explore the possibilities of improving the drying process and dried lumber quality.

Methods and material

Geographic position and characteristics of plantation: trees from two 8-yers-old fast-growth plantation were chosen to research drying problems in lumber. One plantation was located in a Northern region of Costa Rica with a tropical dry climate, with temperature from 21 and 31 °C, precipitation of 1620 mm per year and a dry season extending from November to May. It was planted by Precious Woods S.A. (MACORI) Company. The second plantation was located in tropical wet climate with temperature from 20 and 25 °C, average precipitation of 2953 mm and with short dry season extending from February to March. It was planted by Escuela de Agricultura de la Región del Trópico Húmedo (EARTH). The plantation characteristics are detailed in table 1.

Sampled trees: 10 representative trees for each plantation were harvested as a second thinning of the *V. guatemalensis* plantations (Petit and Montagnini, 2006). The all harvested trees were comparable with average DBH, with a straight bole, normal branching, and absence of pests or diseases. North orientation was marked on each tree prior to harvesting and then marked on each log. From each selected tree, two 2.5 m logs were obtained, one from the tree base (lower log) and the other from 2.5 to 5.0 m height (upper log). Each log was end-coated to retard drying. All logs were transported quickly to the sawmill of the Instituto Tecnológico de Costa Rica. Logs were sawn using a pattern designed to produce 2.5 cm thick boards with the different orthotropic directions commonly used in Costa Rica to obtain wood for the furniture industry. Information of this sawing pattern can be seen in Moya and Muñoz (2008). The boards from north part of each log were separated from those for south part. An edger was used to eliminate the bark. Each board was properly identified by climatic condition, height, pith, location geographic position, and tree number. 258 boards were obtained from all logs, however some were eliminated, resulting in 247 boards selected for this studied.

Moisture content (MC) determination: MC was determined before drying (initial moisture content, MC_i) and after drying, (final moisture content, MC_f). Two cross sections (2.0 cm and 5 mm in thick) were then cut at 30 cm from upper part of log. A 2 cm thick cross section was used to determine the MC_i and a 5 mm cross section was utilized to classify lumber according to grain patters. The lumber length utilized for drying was 2.15 m. After drying, a cross-section in upper part of the tree was cut for MC_f determination. MC determination was carried out according to ASTM D1442-92 (ASTM 2003)

Heartwood determination in cross-section and board classification: the boards were classified before drying. Their grain patterns were viewed in cross section and each board was classified as follows: flat sawn (FS), quarter sawn (QS), rift sawn (RS), and double rift sawn (DRS) (Figure 1b). A 5 mm cross section was scanned and then its total, heartwood, and tangential and radial area were measured. Finally, heartwood and different grain pattern were expressed in percentage of total area.

Drying process and moisture content control: two drying schedules were used to dry to 10% MC. A referred schedule T2-D4 (Table 2) proposed Boone et al. (1988) for wood from natural forest was used and it was named “fast drying” (FD). The second schedule (Table 2) used higher equilibrium moisture contents in all drying steps. It was slower than T2-D4 schedule and it was named “slow-drying” (SD). Total drying time was 150 hours for fast-drying and 227 hours for show drying. 112 boards from north part of each log were used in FD and another 112 board in SD. There were chose six representative boards of material. And six moisture probes of pilot kiln were located at different heights of the package (1.0 m wide, 1.5 m high and 2.5 long). The real MC was also monitored using six kiln samples located at different pile heights and the moisture probe were used as reference to make changes to both the temperature and relative humidity inside the kiln. The kiln samples were cut in middle of

long of six representative boards and the probes measurements were located in the same boards during drying. The kiln sample was weighted twice time per day and simultaneously was recorded the MC displayed for moisture probes.

Wet pocket determination: After drying each board was evaluated for the presence of wet pocket (WP). A 1.5–2.0 mm thick cross section was cut at 30 cm from the end of each board. Cross sections were inspected against the light for the presence or absence of WP, according with methodology suggested by Coutts and Rishbeth (1977) on thin cross sections. Regions with moisture concentrations, for example in WP, appear translucent against the light while areas without appear opaque. WP were located in the tangential or radial part of the board. The outline of WP was marked and a digital picture taken before oven drying each sample. WP area was determined by using Image Tool Software® (Health Science Center 2006).

Statistical Analysis: before analysis of variance or other analyses was necessary to demonstrated satisfaction its assumptions, mainly normality and homogeneity of variance. Data transformations were necessary. $X^{1.5}$ and X^{-2} transformations were applied for MCi and MCf, respectively. The UNIVARIATE procedure of SAS System for Windows release 8.1 (SAS Institute Inc., Cary, N.C.) was used to test assumptions of analysis of variance. A mixed linear model was used in the analysis of variance of moisture content. The model included the following sources of variation: tree height, climatic type, grain pattern, distance from pith, and heartwood percentage for MCi. In addition to the above variables, we included the percentage of wet pocket area and drying type in MCf. The second order interactions were included in the model. The produce GLM of SAS (SAS Institute Inc. 2001) was used to estimate the significant of sources of variation. SAS (SAS Institute Inc.) and STATISTICA 6.0 (Statsoft Inc.) programs were used for the statistical computations.

Results and discussion

The MCi average was 159% for all boards, although a large variation was found (range 98% to 281%). Others studies with natural forest and plantation trees of *V. guatemalensis* found results MCi similar to ours. González *et al.* (1973) and Llach (1973) reported averages of 185% and 136% respectively for trees from natural forest. Moya et al. (2009) and Moya and Muñoz (2009) found averages of 177% and 146% for 10 and 8 years-old trees, respectively, growing in plantation condition. On the other hand, others tropical species with similar gravity specific (GS) than *V. guatemalensis* (GS= 0.32) growing in plantation condition reported higher values and high variability of the MCi. For example, *Gmelina arborea* (SG=0.40) averaged 170% and its variation was from 144% and 181% (Muñoz and Moya, 2008), *Hyeronima alchorneoides* (SG= 0.48) had MCi of 113% and variation from 98% to 120% (Moya et al., 2009), *Bombapcosis quinata* (SG=0.32) averaged 157% with a variation from 102% and 225% and *Cupressus lusitanica* (SG= 0.43) was found 106 % with a variation from 54% to 157% (Moya and Muñoz, 2009).

Skaar (1972) mentioned that most of the water in green condition is located in lumina of fiber and vessels and a minor quantity in the wall cell. The spaces in anatomical wood structure depend on specify gravity. This means that large cell space produces lower values of SG and higher MC in *V. guatemalensis*. Juvenile wood presence can be another factor that affects the higher MCi in lumber of *V. guatemalensis*, since moisture content is a characteristic of juvenile wood (Zobel and Sprague, 1998). Ours 8-years-old trees probably have high juvenile wood content with high moisture content.

The MCf average was 13.1% with a high variation (from 10 to 24%). These results confirmed that dried lumber of *V. guatemalensis* is susceptible to produce a non-uniformity MCf. Moya et al. (2008) found a variation of 9.5 to 20% with 2.5 cm-thick lumber from 10-

year-old trees when they established 12% in MCf in drying schedule. The lack uniformity in MC in dried lumber is an important problem in manufacturing for it contributes to dimensional instability and to decrease the problem in manufacturing process (Steel et al, 1990). The lack of uniformity in MCf in dried lumber had been found in other wood tropical plantation species. For example, 2.5-thick dried lumber of *Gmelina arborea* varied from 4 to 14% when MCf target was 8% (Muñoz and Moya, 2008) and from 10 to 36% when target was 10% (Moya and Muñoz, 2008). The MCf variability occurred in kiln-dried lumber; however MC variation should be minimized to improve stability and quality of lumber and thus increases lumber value (Milolta, 2008). A variation of $\pm 1\%$ is considered as satisfactory drying (LPF, 1999), but the variation in MCf was higher than $\pm 1\%$ for lumber of *V. guatemalensis* from plantation trees.

Analysis of variance showed that MCi was significantly affected by climate, height of boards in tree and radial position and heartwood presence. The interactions among different factors studied were not statistically significant for MCi and MCf (Table 3). Table 4 and 5 shows the average MCi and MCf for all conditions studied. MCi in lumber in dry climate was higher than lumber from trees growing in wet climate. However, large variation was found in lumber from both climatic conditions (Table 4). *V. guatemalensis* has different performance of MCi with distance of pith than other species. The distance of pith was not statistically significant for MCi (Table 3) in WT and DT (Figure 2a). The MCi decreased from pith to bark in *G. arborea*, *Cedrela odorata*, *Acacia mangium* and *Acacia auriculiformis* (Moya and Muñoz, 2008; Ofori & Brentuo, 2005; Yamamoto et al., 2003). The higher MC near to pith explained by presence of juvenile wood with large diameter vessels and fiber diameter and lower density (Zobel and Sprague, 1998). Although, we did not measured variability in anatomical features in *V. guatemalensis*, other research showed that wood density, diameter of

vessels and pores frequency were stable with distance of pith (Butterfield et al., 1993). Therefore MCi was probably affected by distance from pith.

We can see in figure 2a that MCi is constant from pith until 60% of distance of pith to the bark, after which some MCi values are higher than 200%. These higher values occurred in boards with higher heartwood content. The lumber with heartwood averaged 182% in MCi, which is statistically higher than in sapwood lumber (Table 4). There are two aspects related to heartwood presence: (1) MCi in these wood was not affect by climatic condition: the MCi values were highest in heartwood in WT and DT and (2) MCi value in boards increases with the increasing heartwood area in boards cross-section (Figure 2b).

The higher MCi values in heartwood compared with sapwood of *V. guatemalensis* is not common in other wood species (Haygreen and Bowyer, 1982). MCi in sapwood is usually higher than MCi of heartwood; especially in wood with lower specify gravity (Skaar, 1972). However, wetwood presence can affect this relationship. Wetwood is an abnormal condition that develops usually in heartwood. Anaerobic bacteria are considered the main cause for wetwood formation in living trees (Ward and Pong 1980). Although, we did not test bacterial infection in heartwood of *V. guatemalensis*, we suppose that it probably caused the higher MCi. Other researches carried out in other tropical fast-growth plantation, as such *G. arborea* and several acacia species (Moya et al., 2009; Yamamoto et al, 2003) had shown wetwood.

Tree height had a statistically significant effect ($\alpha > 0.05$) on MCi (Table 3). Lumber from lower parts of trees or basal logs have higher MCi than lumber from logs between 2.5 and 5.0 meters height. This phenomenon was found in trees from different climatic conditions, sapwood/heartwood and different grain pattern (Table 4). The decrease of MCi with tree height in *V. guatemalensis* agreed with other plantation trees in tropical regions, such as *Cupressus lusitanica*, *Bombacopsis quinatum* (Moya and Muñoz, 2010), several Acacia species

(Yamamoto et al, 2003) and species studied in India (Rawat and Mirdura, 1993). The wood properties variations with tree height are common and they are caused by different water requirements during physiological process at different height of trunk (Zobel and Van Buijtenen, 1989).

ANOVA showed that climatic condition affects MCi. The highest value of MCi was found in dry climate (Table 4). During wood formation, the cambial activity and consequently fiber formation, is affected by different ecological conditions, plantation management, soil conditions, genetic aspects and tree age (Zobel and Van Buijtenen 1989). The anatomical features are modified within trees during their growth in order to adjust physiologically, and then they maintain their existence in the species (Baas 1982). *V. guatemalensis* wood has shown anatomical variations with growing conditions. González and Fisher (1998) found that sites with low precipitation in Costa Rica produce longer fibers and lower vessel frequencies than sites with high precipitation. However, vessel diameter was not affected by climate. High vessel frequency in trees for dry condition produces more void space, which contains water in green condition.

Analysis of variance showed that MCf was significantly affected by height and radial position in tree, heartwood presence, drying schedule and WP presence (Table 3). MCf in boards near to pith reaches a higher MC than boards located near to bark (Figure 3c), so the boards near the pith will have a high MCf if they are dried in the same batch as boards near the bark. According with results, we can reduce the difference in MCf during a drying process. During sawing, lumber from inner (near pith) and outer (near bark) can be separated and drying in different batch. In other tropical plantation species, for example *Gmelina arborea*, *Cedrela odorata*, *Acacia mangium*, and *Acacia auriculiformis*, was found that MCf has relationship with distance of pith. Highest values were found in boards near the pith with MC decreasing

and with increasing distance from pith (Moya and Muñoz, 2008; Ofori & Brentuo, 2005; Yamamoto et al., 2003). However, the variation in MC_i, SG and wood anatomy were other factors that affect the MC_f variation in these species.

Although heartwood presence was not statistically significant with MC_f variation (Table 3), it is important to note that boards with MC_f higher than 12% are boards with higher heartwood content (Figure 2d). It was discussed above that there probably is wetwood in *V. guatemalensis*. Low permeability and diffusion coefficient and low rate of drying are common in boards infected with wetwood (Jeremic *et al.* 2004, Moya et al., 2009), resulting high MC_f after drying. It is probably the cause the highest MC_f found in dried lumber of *V. guatemalensis* with heartwood (Table 4).

Another important finding was that dried lumber of *V. guatemalensis* produces wet pockets, which is a zone with higher than average moisture content that might extend for a large portion along the width and length of a board (Simpson 1991). Wet pocket was measured in 19% of the 225 boards, with large variations in areas and shapes. Final average MC of cross sections varied from 12 to 35%. Boards with radial grain pattern (QS, RS and DRS) were most likely to generate WP at the end of the drying process (Figure 3). Boards with QS pattern, WP was presented 1.33%, 13.33% of total boards for DRS and in boards with RS with 4.33% and any boards with FS was not presented wet pocket. Increasing of wet pocket area increases MC_f of the boards (Figure 2d). It was found that wet pocket presence was not related with sapwood or heartwood presence, tree height, distance from pith, climatic condition or schedule. Moya and Muñoz (2008), in their study of *G. arborea* agreed with the results found in *V. guatemalensis*. They established that WP was produced in boards with radial grain pattern (QS, RS and DRS) and its MC_f varied from 15% to 35%. Although, defects of drying defects in *V. guatemalensis* were not determined, the wet pockets are associated with shrinking defects such

as crook, bow, twist, cup, check or split (Simpson 1991; Moya and Muñoz, 2008). These defects cause boards to be rejected in manufacturing process because of their poor performance in service (Simpson 1991).

Grain pattern significantly affected MCf (Table 3). MCf in boards with QS was statistically higher than MCf of FS board (Table 4). Both tangential and radial directions show different water movement speeds (Pang, 2002). The anisotropy is due to the different orientation of cell elements in wood (Haygreen and Bowyer, 1996). In board tangential direction steam flow or water diffusion occurs through rays, while in the radial direction, the movement occurs through the fiber pits (which are located generally on the radial face) (Pang 2002). These results indicate that FS boards dry faster than QS boards. For better MCf control after drying is necessary to separate for grain pattern.

There is a statistically significant in MCf between fast and slow drying (Table 5). MCf in slow drying was higher than in fast drying for both sapwood and heartwood in difference climatic condition (Table 5). 150 hours were necessary in fast drying and 221 hours in slow drying. Our drying time results of MCf variation agree with others reports. Moya et al. (2008), using 2.5 cm thick with MCi of 176.9% from 3-year-old plantation found a drying time of 227 hours with using a slow drying schedule.

Although MCf computed in both drying schedules was 12% (Table 2), there is a statistically significant difference in MCf. Slow drying produces MCf of 14.6%, whereas fast drying averaged 11.7%. The variation of MCf for fast drying varied from 9.6% to 16.9% and in slow drying varied from 10.4% to 24.4% (Table 5). Variation between MCi in kiln samples (used for kiln process control) and MCi of boards affected probably in the difference in MCf between two dry schedules. It was determined that the MCi of kiln samples was lower than MCi of lumber in slow drying (Table 5). The MCi of kiln samples of slow drying was 115%

and MCi of lumber was 162%. Meanwhile, there was not large different in MCi between kiln samples and all boards in fast drying (Table 5). The slow drying schedule increases uniformity of MCf ($\pm 4\%$), although it is uneconomical with longer drying time. However, we can be produce lumber with better quality and less rejection due to high MC.

On the others hand, although MCi of lumber from different climatic conditions are significant different, it was found that climatic condition did not affect the MCf variation (Table 3). This result suggest that others factors, such as development of WP, grain pattern or schedule drying applied, present important influences on MCf.

Conclusion

Green lumber of *V. guatemalensis* from fast growth plantations has high moisture content (almost 150%) with variation over 40%. The MCi does not vary from pith to bark, but tree height affects MCi, with highest MCi was found in the lower part of the tree. Wood from dry tropical climates presented higher MCi than wood from humid tropical climates. Another important influence on high MCi is the presence of heartwood. Heartwood lumber averaged 225% and sapwood lumber averaged 150%.

The MC after drying is not uniform in *V. guatemalensis*. It varies from 10% to 24%. The highest values are found in boards cut near the pith, boards with quarter sawn and boards with heartwood. Drying schedule produces MCf variation too. There is less MCf variation in slow drying than fast drying.

Acknowledgements

The authors wish to thank Escuela de Agricultura de Trópico Húmedo (EARTH) and Maderas Preciosas de Costa Rica (MACORI) for raw materials and facilities for the study. We

thank the Vicerrectoría de Investigación y Extensión at the Instituto Tecnológico de Costa Rica for financial support.

References

- ASTM (American Society for Testing and Materials, US) (2003) ASTM D-1442-92, Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurements of Wood and Wood-Base Materials (Reproved 2003).
- Baas, P. (1982) Systematic, phylogenetic and ecological wood anatomy. In: New perspectives in wood anatomy: systematic, phylogenetic and ecological wood anatomy. Eds Baas, P. Martinus Nijhiff Publishers. The Netherlands. pp. 23-58
- Butterfield, R.P., Crook, R.P., Adans, R., Morris, R. (1993) Radial variation in wood specific gravity, fiber lengths and vessel area for two Central American hardwoods: *Hyeronima alchornoides* and *Vochysia guatemaltensis* natural and plantation-grown trees. IAWA J. 14: 153-162
- Calvo-Alvarado, J.C., Arias D., Ritcher, D.D. (2007) Early growth performance of native and introduced fast growing tree species in wet to sub-humid climates of the Southern region of Costa Rica. For. Ecol. Manag. 242: 227-235
- Chen, Z., Lamb, F. (2004) A vacuum drying system for green hardwood parts. Dry. Technol. 22:577-595
- Coutts, M.P., Rishbeth, J. (1977) The formation of wetwood in grand fir. Eur. J. For. Pathol. 7: 13-22
- Forest Products Laboratory. 1999. Wood handbook—Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, For. Prod. Lab. Madison, 1999.

- González, D. Descripción anatómica de once especies forestales de uso industrial en Panamá. Serie Técnica. Informe Interno CATIE. Proyecto cultivo de árboles de uso múltiple (MADELEÑA). Turribalba Costa Rica, 1991.
- González, E., Fisher, R. (1998). Variation in selected wood properties of *Vochysia guatemalensis* from four sites in Costa Rica. For. Sci. 44: 185-191.
- Haygreen, J., Bowyer, J. Forest Products and Wood Science. 3th edition. Iowa State University Press, Iowa, 1996
- Health Science Center (2006) Image Tools. Texas University—San Antonio. Download 15 February 2006. (Online). <http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/download.html>
- Hunterlab. Use measurement of appearance. A welly-Interscience publication, Welly and Sond, New York, 1995
- Janin, G., Gonzalez, J., Ananias, R., Charrier, B., Fernandes, G., Dilem, A. (2001) Aesthetics appreciation of wood colour and patterns by colorimetry. Part 1. Colorimetry theory for the CIELab Sistem. Maderas: Ciencia y Tecnología 3: 03-13
- Llach, L. Propiedades físicas y mecánicas de ciento trece especies maderables de Panamá. Parte 3: Laboratorio de Productos Forestales. Universidad de Costa Rica, 1971.
- Liu, S., Loup, C., Gril, J., Dumonceaud, O., Thibaut, A., Thibaut, B. (2005) Studies on European beech (*Fagus sylvatica* L.). Part 1: Variations of wood color parameters. Ann. For. Sci. 62: 625-632.
- Mononen, K., Alvila, L., Pakkanen, T. (2002) CIELab Measurements to determine the role of felling season, log storage and kiln drying on coloration of silver Birch wood. Scand. J. For. Res 17: 179-191, 2002

- Montagnini, F. (2007) Management for Sustainability and Restoration of Degraded Pastures in the Neotropics. In: Post-Agricultural Succession in the Neotropics. Ed. Wyster, R. Springer Verlag, New York, pp. 265-297.
- Möttönen, V. (2006) Variation in Drying Behavior and Final Moisture Content of Wood during Conventional Low Temperature Drying and Vacuum Drying of *Betula pendula* Timber. Dry. Tech. 24: 1405 – 1413
- Moya, R., Muñoz, F. (2008) Wet Pockets in kiln-dried *Gmelina arborea* lumber. [J Trop. For. Sci. 20: 48-56.](#)
- Moya R., Muñoz F. (2009). Physical and mechanical properties of eight species growing in fast-growth plantations in Costa Rica. J. Trop. For. Sci. (submit)
- Moya, R., Leandro L., Murillo, O. (2009) Wood characteristics of *Terminalia amazonia*, *Vochysia guatemalensis* and *Hyeronima alchorneoides* planted in Costa Rica. Bosques 30: 78-87
- Muñoz, F., Moya, R. (2008) Moisture content variability in kiln-dried *Gmelina arborea* wood: effect of radial position and anatomical features J Wood Sci 54:318–322
- Ofori, J., Brentuo, B. (2005) Green moisture content, basic density, shrinkage and drying characteristics of the wood of *Cedrela odorata* grown in Ghana. J. Trop. For. Sci. 17:211–223
- Pang, S. (2002) Effects of sawing pattern on lumber drying: Model simulation and experimental investigation. Dry. Tech. 20:1769-1787
- Petit, B., Montagnini, F. (2006). Growth in pure and mixed plantations of tree species used in reforesting rural areas of the humid region of Costa Rica, Central America. For. Ecol. Manag. 233: 338-343

- Rawat, J.K, Mirdura, N. (1993) Moisture content in the bole and part of some important species. *Indian For.* 119: 667-669
- Skkar, C. *Water in Wood*. 1 ed. Syracuse University Press, Syracuse, 1972.
- Solis C. M., Moya R. R. *Vochysia guatemalensis* en Costa Rica. Fondo de Financiamiento Forestal (FONAFIFO). Ministerio de Energía y Minas. Costa Rica. San Jose, 2003.
- Vanclay J. K., Henson M., Palmer G., (2008). Color variation and correlations in *Eucalyptus dunnii* sawnwood. *J. Wood Sci.* 54: 431-435.
- Ward, J.C., Pang, W.Y. (1980) *Wetwood in trees: a timber resource problem*. United USDA, Pacific Northwest Forest and Range Experimental, General Tech. Rep. PNW-112, U.S. Forest Service, Madison, 1980.
- Yamamoto, K., Sulaiman, O., Kitingan, C., Choon, L., Nhan, N. (2003) Moisture distribution in stems of *Acacia mangium*, *A. auriculiformis* and hybrid acacia trees. *JARQ.* 37 (3): 207-212
- Zobel, B.J., Sprague, J.R. *Juvenile Wood in Forest Trees*. Springer- Verlag, Heidelberg, 1998.

Table 1. Plantation characteristics of fast-growth plantation of *V. guatemalensis*

Climatic condition	Tree age (years)	Plantation Density (n/ha)	Diameter breast (cm)	Basal area (m ² /ha)	Tree height (m)	Commercial height (m)	Volume (m ³ /ha)
Dt	8	464	26.09	25.59	18.51	12.61	215.34
Wt	8	486	26.32	25.53	17.89	10.99	212.35

Legend: Dt=dry tropical, Wt= wet tropical

Table 2. Kiln schedules used applied for drying *Vochysia guatemalensis*

Step	Fast-drying*			Show-drying		
	TBS °C	EMC %	RH %	TBS °C	EMC %	RH %
Heating	35	14.8	-	35	18.0	-
Drying	38	14.3	50	38	17.0	50
	38	11.9	45	38	15.0	45
	38	11.9	35	38	13.0	35
	43	10.5	30	44	11.0	30
	44	7.6	30	44	9.0	30
	49	5.5	25	49	7.0	25
	55	4.0	20	55	5.0	20
	66	3.2	15	66	3.2	15
	66	3.2	12	66	3.2	12
Equalization	66	3.2	12	66	3.2	12
Conditionings	60	3.5	-	60	3.5	-
Cooling	30	3.5	-	30	3.5	-

*Dryings schedule suggest by Boone et al. (1988).

Legend: TBS= Dry-bulb temperature, EMC= equilibrium moisture content, RH=relative humid.

Table 3. Analysis of variance for initial and final moisture content in *V. guatemalensis* kiln-dried lumber (N=224)

Source	DF	MCi transformed ($X^{-1.5}$)		MCf transformed (X^{-2})	
		MS	F-Value	MS	F-Value
Drying schedule	1	-	-	0.0003	218.0**
Tree height	1	462 x 10 ⁻⁹	23.42**	374 x 10 ⁻⁹	0.269
Climate	1	247 x 10 ⁻⁹	12.53**	414 x 10 ⁻⁸	2.982
Heartwood presence (%)	1	13 x 10 ⁻⁸	6.569*	35 x 10 ⁻¹⁰	0.0025
Grain pattern	3	14 x 10 ⁻⁹	0.718	452 x 10 ⁻⁸	3.255*
Distance from pith (%)	1	75 x 10 ⁻⁹	0.380	133 x 10 ⁻⁷	9.589**
Wet pocket area (%)	1	-	-	7 x 10 ⁻⁷	3.503*
Climate * grain pattern	2	6 x 10 ⁻⁸	3.019	216 x 10 ⁻⁸	1.555
Tree height * heartwood presence	1	22 x 10 ⁻⁹	1.138	4 x 10 ⁻⁸	0.0285
Climate * heartwood presence	1	17 x 10 ⁻⁹	0.846	277 x 10 ⁻⁹	0.199
Tree height * grain pattern	2	38 x 10 ⁻¹⁰	0.193	196 x 10 ⁻⁸	1.412
Tree height * Climate	1	4 x 10 ⁻¹¹	0.0020	37 x 10 ⁻⁸	0.267
Grain pattern * heartwood presence	2	18 x 10 ⁻¹¹	0.0090	24 x 10 ⁻⁷	1.728

Legend: * Statistically significant at $\alpha=0.05$, ** statistically significant at $\alpha=0.01$, GF= Grades freedom, MS=mean square of error.

Table 4. Averaged of MCi and MCF for different condition studied in kiln-dried lumber of *V. guatemalensis*.

Variable		Initial moisture content (%)	Final moisture content (%)		
			Average	show drying	Fast drying
Climatic condition	Wet tropical	151A 36.3 (107-276)	12.9A 1.9 (9.6-21.4)	14.2 2.0 (10.7-21.4)	11.6 1.0 (9.6-13.9)
	Dry tropical	166B 42.4 (98-281)	13.3A 2.7 (9.6-21.8)	15.0 3.3 (10.4-24.4)	11.8 1.7 (9.6-16.9)
	Lower	171A (122-281)	13.2A 2.4 (21.2-9.6)	15.1 2.8 (10.7-24.4)	11.7 1.1 (9.6-14.1)
Upper	145B (98-270)	12.9A 2.4 (9.6-21.8)	14.0 2.5 (10.4-21.8)	11.8 1.6 (9.6-16.9)	
Kind of wood	Sapwood	150A 31.8 (98-281)	12.9A 2.1 (9.6-21.4)	14.1A 2.3 (10.4-24.4)	11.5A 1.2 (9.6-16.9)
	Heartwood	182B 51.1 (115-278)	13.6A 2.9 (9.7-21.8)	16.7A 3.3 (12.3-24.3)	12.1A 1.6 (9.7-16.2)
	Grain pattern	Quarter sawn	171A 46.6 (272-107)	14.2B 2.5 (11.3-21.2)	16.7b 3.0 (14.0-21.2)
Double rift sawn	166B 48.8 (98-281)	13.5A 2.7 (9.6-21.8)	15.6B 3.1 (10.4-24.4)	11.8A 1.4 (9.6-16.9)	
Rift sawn	173A 57.1 (123-255)	14.7B 2.5 (11.8-18.4)	15.9B 3.2 (12.3-18.4)	13.7B 1.7 (11.8-15.4)	
Flat sawn	148C 21.6 (208-107)	12.3A 1.5 (9.6-17.7)	13.5A 1.8 (10.7-21.5)	11.0A 0.7 (9.6-12.3)	

Table 5. Variation of initial and final moisture content of *V. guatemalensis* lumber according to drying schedule

Type of moisture content		Fast drying	Slow drying	Average
Initial	All boards	156	162	159
	Kiln samples ¹	39.4 (108-281)	41.1 (180-120)	40.3 (98-281)
Final	All boards	137	115	126
	Kiln samples	3.9 (133-143)	3.7 (109-120)	11.7 (109-143)
Final	All boards	14.6	11.7	13.1
	Kiln samples	2.7 (10.4-24.4)	1.4 (9.6-16.9)	2.4 (9.6-21.8)
Final	All boards	12.2	12.0	12.1
	Kiln samples	12.2	12.0	12.1

¹ We monitored real moisture content with six kiln samples located at different locations in pile.

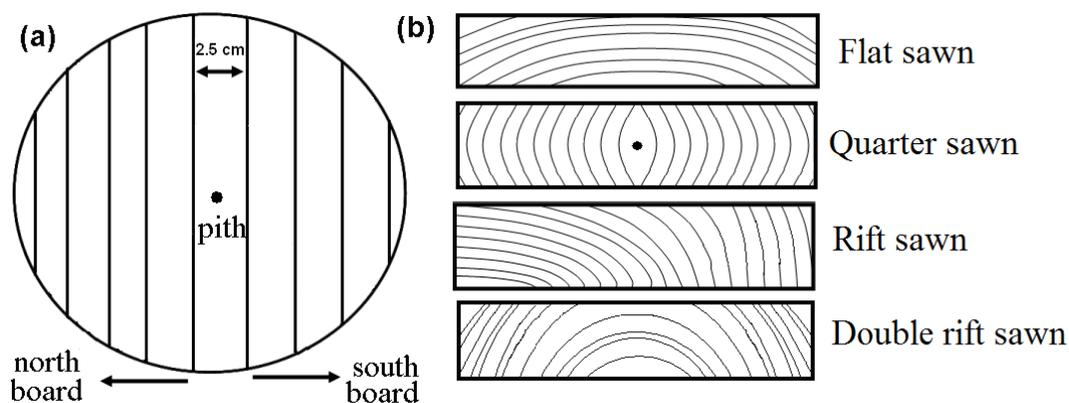


Figure 1. (a) Pattern saw used to obtain lumber and (b) different grain patterns.

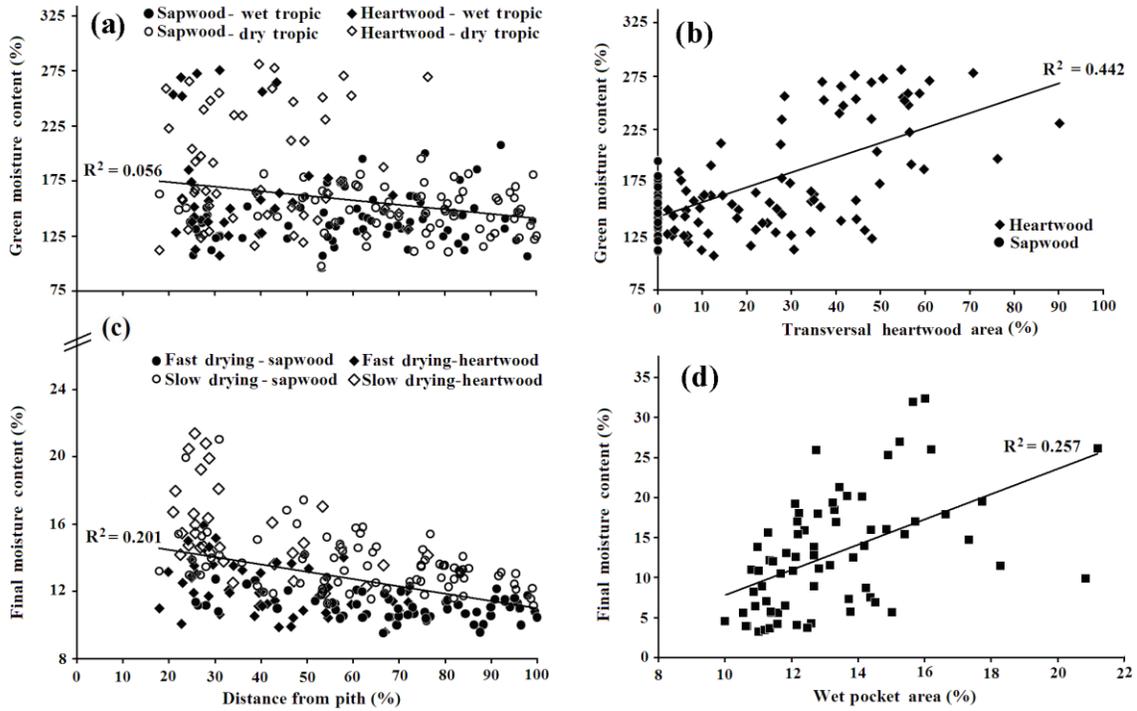


Figure 2. Variation of MCI and MCf in relation pith distance and heartwood and wet pocket presence.

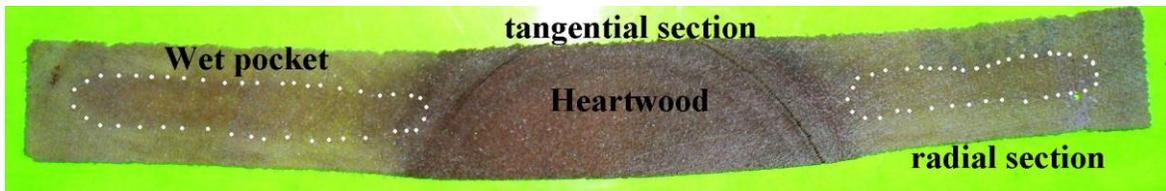


Figure 3. Wet pockets in dried wood of *V. guatemalensis* in double rift sawn board.

Anexo 3: Artículo científico Tenorio, C; Moya, R. 2010. Factores de variación del contenido de humedad, color y defectos en la madera de *Acacia mangium* (Willd) antes y después del secado. *Drying Technology (A someter)*.

Factores de variación del contenido de humedad, color y defectos en la madera de *Acacia mangium* (Willd) antes y después de secado

Carolina Tenorio M¹

Roger Moya R²

RESUMEN

Acacia mangium es actualmente una de las especies más utilizadas en plantaciones comerciales en Costa Rica. No obstante, los usos de su madera han sido restringidos debido a que presenta algunos problemas en el proceso de secado. Se señala que la madera aserrada presenta altos contenidos de humedad inicial (CHi), una alta variabilidad del contenido de humedad final (CHf), cambios de coloración en el duramen y ocurren una alta incidencia de defectos. Se investigaron las causas de estos problemas, tomando en cuenta factores como el clima o procedencia de la madera, la altura (posición de la troza en el árbol), el patrón de corte aplicado en el aserrío, el tipo de programa de secado utilizado, la posición radial de la tabla en la troza (distancia de la médula) y la presencia de albura o duramen. Los resultados mostraron que el CHi de la madera aserrada fue en promedio de 127 % y se presentó una variación de 58 a 186 %. Y los parámetros que influyeron en esta variación fueron el clima, la altura del árbol y tipo de patrón de corte que se aplica en la troza. Luego del secado se presentó un CHf de 19 %, con una variación de 9 a 52 %. La poca uniformidad en el CHf luego del secado es influenciado por la altura, el tipo de secado y la interacción de ambos factores. Así mismo, fue encontrado que durante el secado se desarrollan de bolsas de humedad y la incidencia de estas aumenta en la

¹ Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica.
Email: ctenorio@itcr.ac.cr

² Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica.
Email: rmoya@itcr.ac.cr

madera proveniente de árboles creciendo en climas tropicales muy húmedos, en procesos de secado de baja humedad relativa en la cámara y en maderas aserradas con patrones de corte combinados. El cambio de color de la madera durante el secado se produjo por tipo de secado aplicado en la madera y el tipo de clima donde crece el árbol. Los defectos de secado y contracciones en *A. mangium* son catalogados como nulos o leves en la mayoría de los casos, y se ven afectados por el clima, el patrón de corte, el CHI y CHf, y el tipo de secado.

Palabras claves: bolsas de humedad, contracciones, secado convencional, madera tropical, uniformidad, Costa Rica.

Sources of variation in moisture content, color and defects in *Acacia mangium* (Willd) wood before and after drying

ABSTRACT

Acacia mangium is an important plantation specie planted in Costa Rica. However, the wood uses have been limited by drying problems such as high initial moisture content (CHi), a high variability of final moisture content (CHf), wood color variation in heartwood, a high presence of drying defects. The aim objective of this research was investigated the causes of these problems. It was considered climatic conditions where tree growth, height of the tree, grain pattern, drying schedules, distance from pith and sapwood or heartwood presence. The results showed that the CHi averaged from 127 % and its variation was from 58 to 186 %. The variation of CHi was influenced by climatic conditions, tree height and grain pattern. The MCF averaged 19 % and varied from 9 to 52 %. The lack of uniformity in the CHf after drying is influenced by tree height, drying schedule and the interaction of both factors. Also, it was found that wet pockets are development during drying. The lumber from trees growing in humid tropical climates, drying processes with low relative humidity in kiln dry and sawn timber with rift sawn or double rift sawn is likely to develop wet pocket. The color change of wood during drying was affected by the drying schedule and climatic conditions. Drying defects and shrinkages are classified as nulls or likely present and they were affected by climate, grain pattern, the CHi and CHf, and drying schedule.

Keywords: wet pockets, shrinkage, kiln dry, tropical wood, moisture uniformity, Costa Rica.

INTRODUCCION

El secado de la madera es una etapa importante en los procesos de manufactura ya que este contribuye a la estabilidad dimensional, la trabajabilidad, la compatibilidad con acabados y adhesivos, y brinda mejores propiedades térmicas, acústicas y de aislamiento eléctrico, además de incrementar las propiedades mecánicas y la resistencia a la biodegradación biológica (Gu *et al.* 2004). Durante el proceso de secado se debe mantener un buen control de todas las etapas que lo componen, esto con el fin de reducir la variación en el contenido de humedad final (CHF) y del color de madera y prevenir los defectos de secado en las piezas (Simpson, 1999; Gu *et al.* 2004). La falta de uniformidad en el CHF de la madera es un problema importante en los procesos de manufactura, ya que este contribuye en la calidad de los productos fabricados (Cai y Hayashi 2007). Del mismo modo, una baja calidad de la madera luego del secado, afecta no solo su valor económico, sino que además influye en algunas de sus propiedades de trabajabilidad y uso final, aumentando los desperdicios (Gu *et al.* 2004). En tanto que el color de la madera debe mantenerse lo más uniforme posible con el fin de tener productos también de igual forma uniformes (Keey, 2005).

Se han señalado diferentes factores que pueden ser los causantes principales de la variación en el CHF, cambios en la coloración de la madera y los defectos en la madera secada, entre los que se destacan: las características propias de las especies, como su densidad y composición química (Möttönen 2006), presencia de extractivos (Burtin *et al.*, 1998; Keey, 2005), la edad del árbol (Qumruzzaman *et al.* 2004), el contenido de humedad inicial de la madera (CHi) (Moya y Muñoz 2008, Ofori y Brentuo 2005), el programa de secado (Simpson, 1999; Gu *et al.* 2004), posición en altura de la pieza de la madera en el árbol (Ofori y Brentuo 2005), presencia de albura y duramen (Yamamoto *et al.* 2003) y la procedencia de la madera (Luostarinen y Mottonen 2004, Gu *et al.* 2004), entre otras condiciones.

Por otro lado, *Acacia mangium* ha sido introducida con buena aceptación en Asia, África, en Centro América, Suramérica y las islas del Caribe (Arisman *et al.* 2006). Su éxito en plantaciones comerciales radica en su rápido crecimiento (Shah Newaz *et al.* 2005), en la calidad de su madera (Yamamoto *et al.* 2003) y a su tolerancia a sitios perturbados, quemados y a suelos agrícolas abandonados (Shah Newaz *et al.* 2005). No obstante, la utilización de madera

de árboles de plantaciones muestra problemas en la calidad de la madera aserrada y en algunos procesos industriales. Yamamoto et al (2003) estudiando el contenido de humedad en condición verde de *A. mangium*, encontraron valores extremadamente altos, de 253% en duramen y 154% en la albura, sugiriendo que este alto valor de humedad se debe a la presencia de “madera húmeda” y factores propios de la madera durante secado (Yamamoto et al. 1997, Larcher 1995).

Más recientemente se han señalado problemas debido a los procesos de secado en la madera de *A. mangium* (Moya et al. 2008, Barsi y Wahyudi 2007 y 2009, Lim et al. 2003, Piao et al. 2000). Moya et al (2008) mencionan que *A. mangium* presenta un mayor incremento en los defectos después de secado (grietas, acanaladuras y encorvaduras), en comparación con otras especies de plantaciones de rápido crecimiento de regiones tropicales. Así mismo dichos autores encontraron una alta variación en el CHF luego del secado. Barsi y Wahyudi (2007) estudiando también varias especies tropicales del Oeste de Papua encontraron que *A. mangium* es una madera con alta presencia de defectos, susceptible a producir grietas, torceduras y reventaduras. Lim et al (2003) haciendo referencia al secado de *A. mangium* menciona la existencia de problemas de secado y que para reducir los defectos es necesario realizar un presecado al aire antes de realizar el secado convencional. En tanto Piao et al (2000) contrario a los otros autores mencionan que la especie es de fácil secado, pero con alta incidencia a colapso y reventaduras, también sugieren que realizar un presecado antes de secar en cámara es importante y debe acompañarse por un secado lento.

Visualmente la madera de *A. mangium* ha sido catalogada por algunos investigadores como de color marrón amarillento a marrón dorado en condición verde, y marrón mate en madera seca (Sahri et al., 1993). Sin embargo los posibles factores que afectan el cambio de color en la madera de la especie por el secado no han sido estudiados.

Debido a la alta importancia de *A. mangium* como especie de reforestación, a los posteriores usos de la madera de la misma, y debido a la poca información y a la incongruencia que existe en la presencia y causas de variación del CHI y CHF, la incidencia de defectos y los cambios de color por secado, es que el presente trabajo tiene como objetivo determinar los factores de variación del CHI y CHF, del color y los defectos causados en la madera por el secado

convencional, considerando factores tales como procedencia de la madera, tipo de secado aplicado, altura de la tabla (posición de la troza en el árbol), posición radial (distancia de la médula), patrón de corte y la presencia de albura y duramen. La información aca obtenida permitirá tener un conocimiento de las causas por las que se presenta la variación del contenido de humedad y la presencia de defectos luego del secado, para de esta manera tomar en consideración estos factores durante el proceso de secado y así reducir la incidencia de defectos y tener un producto final más uniforme.

MATERIALES Y METODOS

Ubicación y características de las plantaciones

La madera utilizada en el secado fue extraída de dos plantaciones de rápido crecimiento de *A. mangium* ubicadas en dos condiciones climáticas distintas en Costa Rica propiedad de la empresa Ganadera Basa S.A. Una plantación se ubica en la región norte, en el caserío de La Azucena de Pocosol, San Carlos, Alajuela (10° 52' 41" y 84 ° 21' 88") y la otra en la región del pacífica central, en Parrita de Puntarenas (09° 31' 18" y 84 ° 19' 53"), consideradas zonas con clima tropical muy húmedo y clima tropical húmedo respectivamente (Bolaños y Watson, 1993). La edad de ambas plantaciones fue de 9 años, con condiciones de manejo similares, pero de condiciones dasométricas distintas como consecuencia de cada sitio (Tabla 1). En cada plantación fueron establecidas dos parcelas circulares (452 m²) en un área representativa de la totalidad del área plantada para determinar las condiciones dasométricas de la plantación (Tabla 1).

Muestreo de árboles

Diez árboles próximos a las parcelas de medición fueron seleccionados con un diámetro cercano al promedio de la plantación (Tabla 1). Dichos árboles eran de buena forma y estaban libres de daños de ataques de insectos u hongos. Antes de cortar los árboles fue marcada su posición norte. Posteriormente, dos trozas de 2,5 metros fueron cortadas: la primera desde la base del árbol hasta los 2,5 metros (denominado como altura A) y la segunda de 2,5 a 5,0 metros de altura del árbol (denominada como altura B). Las trozas en sus extremos fueron pintadas con el fin de disminuir la pérdida de humedad por los extremos. Todas las trozas

fueron transportadas hacia el patio del aserradero del Instituto Tecnológico de Costa Rica para su procesamiento.

Cuadro 1. Características de las plantaciones de rápido crecimiento de *A. mangium* muestreadas.

Características	Parámetros	Tipo de clima	
		Zona Muy Húmeda	Zona Húmeda
*Condiciones ambientales	Temperatura promedio (°C)	18-24	24-30
	Precipitación promedio (mm/año)	4000-8000	2000-4000
	Temporada seca	Marzo - Abril	Enero - Abril
**Características de la plantación	Edad del árbol (años)	9	9
	Densidad de la plantación (n/ha)	265,26	287,37
	Diámetro a la altura de pecho (cm)	30,55 (4,33)	25,26 (3,19)
	Área Basal (m ² /ha)	33,77 (0,49)	23,04 (0,27)
	Altura total del árbol (m)	24,01 (0,01)	21,65 (3,09)
	Altura comercial (m)	13,25 (5,03)	14,77 (4,23)
	Volumen (m ³ /ha)	322,08 (3,87)	222,99 (1,59)

* Datos climáticos tomados del Atlas Costa Rica (2008), de la capa de zonas de vida de Holdrige.

**Las características de la plantación se obtuvieron de dos parcelas temporales establecidas en la plantación.

Patrón de aserrío y muestreo en la tabla

Antes de iniciar el aserrío de la troza fue medido el diámetro en dirección norte-sur y marcada esta dirección. Las trozas fueron aserradas en tablas de 2,5 cm de espesor y estas fueron cortadas perpendicularmente al sentido norte-sur (Figura 1a). En el momento de obtener cada tabla de la troza se fue midiendo la distancia de la médula, para establecer la ubicación de la tabla en relación al radio de la troza (distancia relativa). La madera proveniente de la parte norte de la troza fue separada de la madera de la parte sur. Un total de 216 tablas se obtuvieron del total de las trozas. Cada tabla fue debidamente identificada y codificada en la parte inferior de la misma, según su tipo de clima (zona muy húmeda y zona húmeda), altura (A y B), la distancia de la médula, la ubicación geográfica de la tabla (norte y sur) y el número de árbol. Luego del proceso de aserrío cada tabla fue cortada transversalmente a 27 cm del extremo inferior del árbol, posteriormente a esa altura fueron extraídas dos secciones transversales: una de 2,5 cm para la determinación del contenido de humedad inicial (CHi) y la otra de 3 mm de

espesor (Figura 1c) para determinar el tipo de corte y la evaluación de la presencia de duramen y albura. Debido a estos cortes realizados en la tabla, la longitud para secar fue de 2,15 m. Además de la pieza de 27 cm cortada inicialmente se obtuvieron tres piezas de 2 x 2 cm para determinar el peso específico, los coeficientes de difusión radial (DR) y tangencial (DT) y los porcentajes de contracción radial y tangencial (Figura 1c).

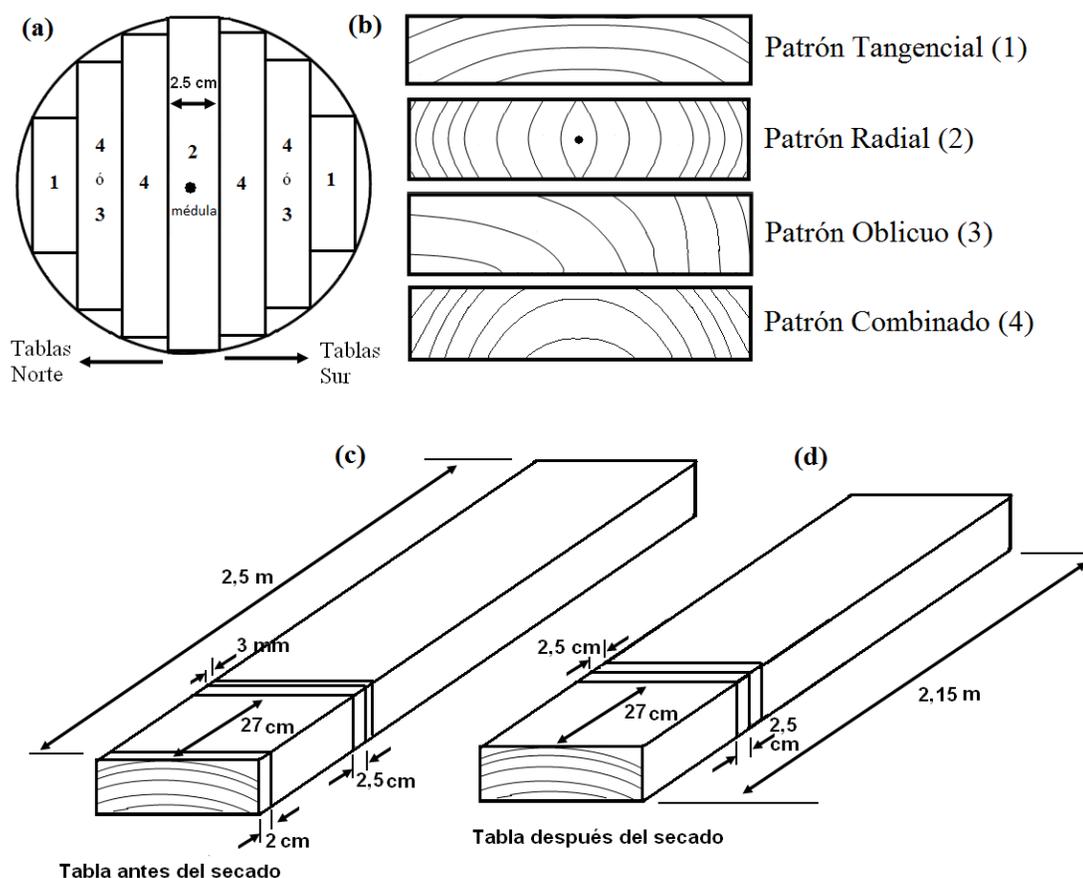


Figura 1. Patrón de aserrío utilizado en cada troza y obtención de muestras para determinación de contenido de humedad en la tabla.

Clasificación de tablas y determinación del porcentaje de duramen y albura

Todas las tablas fueron clasificadas en relación al tipo de corte presente en la sección transversal (Figura 1b) y en la muestra de 3 mm proveniente de cada una de las tablas, fue observado el patrón y clasificado en 4 tipos diferentes: patrón tangencial (1), patrón radial (2), patrón oblicuo: tangencial-radial (3) y cortes combinados: radial-tangencial-radial (4) (Figura

1b). Luego en esta misma muestra fue tomada una foto digital junto con una regla graduada a una resolución de 512 dpi. Y con la ayuda del programa Image Tool® (Health Science Center. 2006) se determinó el área total de la sección, el área de duramen y de albura, para luego calcular el porcentaje de cada uno de estos tipos de madera. Así mismo sobre esta misma foto fue calculada el área tangencial y área radial en la sección transversal de la tabla, y dichos datos fueron usados para calcular los porcentajes de estos cortes.

Secado de la madera

Dos tipos de programas de secado fueron aplicados: el primero fue aplicado a las tablas provenientes del lado sur de la troza y cuyo origen es la combinación de los programas de secado T3-D2 y T8-D2 (Tabla 2) propuesto por Boone et al. (1988) que se caracteriza por usa baja temperatura y alto contenido de humedad de equilibrio (CHE) dentro de la cámara y fue denominado como Secado 1. Un segundo programa, aplicado a las tablas del lado norte, fue diseñado a partir de los resultados del primer programa, esto por que se presentó alta variabilidad en el contenido de humedad final (CHf) y una alta incidencia de bolsas de humedad; este segundo programa fue modificado con un aumento del CHE y una mayor temperatura dentro de la cámara (Tabla 2) y fue denominado Secado 2.

Tabla 2. Programas de secado utilizados en el secado convencional de *A. mangium*

Etapa de secado	Secado 1: de contenido de humedad y temperatura baja			Secado 2: de contenido de humedad y temperatura alta		
	TBS °C	CHE %	CH %	TBS °C	CHE %	CH %
Calefacción	40		-	45		-
	42	18,5	-	50	19,5	-
Secado	44	18,5	55	55	18,5	55
	44	17,6	50	55	17,6	50
	44	17,0	45	55	17,0	45
	44	16,3	40	55	16,3	40
	44	13,6	35	55	13,6	35
	44	9,9	30	55	10,1	30
	49	5,5	25	60	5,8	25
	55	4,0	20	66	4,0	20
	60	2,9	15	71	3,4	15
	71	3,5	12	82	3,5	12
Igualización	71	10	10	82	10	10
Acondicionamiento	71	13	-	82	12	-
Enfriamiento	40	-	-	40	-	-

Legenda: TBS=Temperatura de bulbo seco; CHE= Contenido de humedad de equilibrio dentro de la cámara; CH= contenido de humedad en la madera

Determinación del contenido de humedad

El contenido de humedad fue determinado en dos condiciones; antes y después del secado. Para el contenido de humedad inicial (CHi) se utilizó la muestra cortada transversalmente a 27 cm del extremo. En tanto para el contenido de humedad final (CHf), nuevamente se cortó a 27 cm del extremo superior en las tablas secas una sección transversal de 2,5 cm (Figura 1d). Dichos contenidos de humedad fueron calculados utilizando la norma D-1442-92 (ASTM, 2003).

Determinación de bolsas de humedad

Una vez terminado el proceso de secado a una longitud de 27 cm del extremo inferior, se realizó nuevamente un corte transversal de aproximadamente 2,5 cm de espesor con el fin de evaluar la presencia de bolsas de humedad (Figura 1d). La región con bolsa de humedad (BH) se evidencia transversalmente porque la región con alta humedad posee un color diferente al resto de la madera seca, que por lo general está alrededor de la bolsa de humedad. Sobre esta sección transversal fue delineado y delimitado el borde de la BH. Posteriormente fue tomada

una foto digital y luego con la ayuda del programa Image Tool® (Health Science Center. 2006) fue calculado el área de la bolsa y el área total de esta sección transversal. El área de la bolsa de humedad fue expresada en relación al área total.

Determinación de peso específico, coeficientes de difusión y contracciones

Para determinar el peso específico y los coeficientes DR y DT se utilizaron las muestras de 2 x 2 cm. Se determinó el peso específico básico (peso seco/volumen verde), propuesto en la norma ASTM-143 (ASTM, 2003). Para el cálculo de los coeficientes de difusión se procedió a separar las muestras obtenidas de cada una de las tablas de 2 x 2 x 2 cm en tangenciales y radiales, para la muestra tangencial, cuatro caras fueron selladas con parafina, dejando sin sellar las dos caras opuestas tangenciales. En el caso de las muestras radiales, nuevamente cuatro caras fueron selladas con parafina, pero en este caso se dejaron las dos radiales. Esta preparación de la muestra permite que el agua se difunda en la dirección tangencial o radial según lo deseado. Posteriormente las muestras fueron colocadas a 20°C y 79% EMC de 15%. Las muestras fueron pesadas al iniciar y luego en intervalos de 3 horas durante las primeras 48 horas y luego por cada 24 horas hasta completar 1026 horas, las muestras. Finalmente estas muestras se secaron a 105 °C durante 24 h para determinar su peso seco. Los coeficientes de difusión fueron calculados para cada dirección (tangencial y radial) usando la ecuación 1.

$$D = \frac{E_t^2 * \pi}{16 * t * L^2} \quad [1]$$

D se deriva de la ecuación de Stamm y Raleigh (1967) y se muestra en la ecuación 2.

$$\frac{E_t}{\sqrt{t}} = 4L\sqrt{\frac{D}{\pi}} \quad [2]$$

Donde: L es la longitud de la muestra en la dirección de transporte del agua (mm), t es el tiempo de secado (s) y Et es el cambio relativo en el contenido de humedad de la madera de verde a seco (15% CH).

Las contracciones de la madera fueron medidas en dos condiciones diferentes: una sobre las muestras empleadas para establecer los coeficientes de difusión radial y tangencial, y la segunda en las tablas que fueron sometidas al secado, de esta forma fueron determinadas las

contracciones en espesor y ancho de las tablas. Para determinar las primeras contracciones en cada muestra fue medida su longitud antes y después de la prueba de difusión del agua. En tanto las contracciones por tabla se determinaron por el cambio dimensional que ocurrió en el ancho y en el espesor de la tabla desde la condición verde hasta el contenido de humedad final alcanzado al final del proceso de secado.

Evaluación de presencia de defectos en la madera

En cada una de las tablas obtenidas en el proceso de aserrado (216) fueron medidas las torceduras de la tabla (alabeo, encorvadura, acanaladura y arqueadura), grietas y rajaduras antes y después del secado. Métodos sugeridos de medición por Halcom and Malcom (1972) y Milota (1996), fueron utilizados para la medición de todos estos defectos. Estos valores fueron reportados primeramente por la magnitud del defecto y luego fue cuantificada la cantidad de piezas en relación a la cantidad de piezas totales. En lo referente a la magnitud de los defectos luego del secado fue catalogado en disminuyó, aumentó o se mantuvo en relación a los valores que presentaban las tablas antes del secado. En el grado de severidad de las torceduras (alabeo, acanalado, encorvadura y arqueadura) se siguió la norma oficial chilena, el cual determina los valores límites de calidad para las diferentes torceduras de la madera y dichos valores están detallados en el tabla 3 de Pérez, et al (2007). Una vez cuantificado las torceduras en relación a las categorías de valores, se procedió a establecer un Índice de calidad para cada defecto (Ecuación 3), propuesto en la Norma Chilena Nch993EO72 (mencionado por Pérez et al., 2007). En el caso de la rajaduras y reventaduras se procedió a seguir la norma de clasificación Softwood lumber standard: Voluntary product standard PS 20-05 (NIST, 2005) que clasifica estos dos defectos de secado en 3 categorías de acuerdo a la longitud de estos.

$$\text{Índice de calidad} = Na * 0 + Nb * 0,5 + Nc * 2 + Nd * 2,5M. \quad [3]$$

Donde: I=Índice de calidad, Na=número de piezas sin defectos, Nb= número de piezas con defecto leve, Nc= número de piezas con defecto moderado, Nd= número de piezas con defecto severo y M=número de piezas totales.

Medición del color

El color fue medido en cada una de las 216 tablas utilizando un espectrofotómetro marca MiniSkan XE Plus de HunterLab. El mismo fue calibrado antes de cada uso. Se usó el sistema cromatológico estandarizado CIEL*a*b* para medir el espectro de reflexión. El rango de esta

medida fue de 400 a 700 nm, con una apertura en el punto de medición de 11 mm. Para la observación de la reflexión fue incluido el componente especular (SCI mode), en un ángulo de 10° la cual es lo normal de la superficie del espécimen (D65/10); un campo de visión de 2° (Observador estándar, CIE 1931) y un estándar de iluminación D65 (correspondiente a luz del día en 6500 K). El color fue medido en la tabla antes y después del proceso de secado. Se garantizo que la medición fuese en el mismo punto para evitar errores de medición.

Análisis estadísticos

Primeramente se realizó un análisis descriptivo (media, desviación estándar, coeficiente de variación, valores máximos y mínimos) de todas las variables de respuesta. Así mismo se analizó que dichas variables cumplieran con las suposiciones de distribución normal, homogeneidad de la variancia y la no presencia de datos extremos. Para ello fue utilizado el procedimiento UNIVARIATE procedure del programa estadístico SAS 8.1 para Windows (SAS Institute Inc., Cary, N.C.).

Para analizar el efectos de los diferentes variables sobre el CHI, CHI y los parámetros de color fue realizado primeramente un análisis de correlación para los efectos no controlados o factores cuantitativos y en el segundo análisis fueron considerados aquellos factores no controlados (o cuantitativos) donde las variables de respuestas fueron corregidas por aquellos factores no controlados (tipo de secado, altura de la troza, patrón de corte y clima de crecimiento) que fueron estadísticamente significantes en el análisis de correlación. Para ello fue establecido un análisis de covarianza (ANCOVA). En el análisis de correlación del CHI y los parámetros de color antes del secado (variables de respuesta) fueron considerados la distancia de la medula, el porcentaje de madera de duramen, el porcentaje de madera radial y tangencial, el peso específico básico y las contracciones (variables independientes). Para la variables de respuesta luego del secado (CHI, defectos de secado y parámetros de color) nuevamente fueron correlacionados con las variables de respuestas mencionadas anteriormente, solo que se agregó el CHI, el coeficiente de difusión radial y tangencial. Las diferencias estadísticas entre las medias fueron llevadas a cabo por LSMEANS de las medias ajustadas por los análisis de regresión de la parte de ANCOVA.

Para analizar los defectos de secado el análisis fue solamente considerado el Índice de calidad (Ecuación 3) y fue evaluado por la influencia de altura de la troza, patrón de corte y clima donde crece el árbol en madera antes de secado, pero en el caso de madera luego del secado a

estos 3 factores se agrego el tipo de secado aplicado. Dicha influencia fue evaluada por un análisis de varianza con el índice de calidad como variable independiente y los anteriores factores como variables independientes del modelo.

La evaluación de la bolsas de bolsa de humedad fue analizada desde dos puntos de vista: primeramente se evaluó la presencia o no de la bolsa de humedad en la madera seca por medio de una regresión logística, esto porque la variable de respuesta es binaria, sí o no. Esta regresión fue analizada utilizando la regresión logística multinominal derivada del modelo general probabilístico. El modelo establecido es denotando en la ecuación 3:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \beta_3 * X_3 + \beta_4 * X_4 + \beta_5 * X_5 + \beta_6 * X_6 + e_{ijk} \quad [4]$$

Donde: β_1 = efecto del clima, β_2 : efecto de la altura, β_3 : efecto del tipo de secado y β_4 : efecto del tipo de corte, todas ellas como variables categóricas y β_5 distancia de la tabla respecto a la medula y β_6 porcentaje de madera radial en la tabla., ambas como variables continuas.

RESULTADOS Y DISCUSION

Contenido de humedad inicial (CHi)

El promedio del CHi fue de 127%, con una variación entre 58 y 186%. Esta variación es mayor que la reportada por Moya et al (2011a), los cuales encontraron una variación de 110 a 150% para árboles de 9 años en Costa Rica. En Malasia, Hon (1984) reporta rangos de 88 a 140% y Yamamoto et al (2003) reporta valores de 120 a 160%. Así mismo en otras especies cuyo peso específico es similar al de *A. mangium* (0.45), se reportan también altos CHi y alta variabilidad. Por ejemplo *Gmelina arborea* (0.40) presenta un CHi promedio de 170% con una variación de 144 a 184%, en tanto *Cupressus lusitanica* (0.49) presenta un CHi de 92% con valores que varían de 74 a 112% (Moya et al., 2011a).

El análisis de correlación mostró que el CHi presenta una correlación negativamente significativa con el peso específico, pero la distancia relativa de la médula, el porcentaje de duramen en la tabla y el porcentaje de madera de corte radial no afectaron estadísticamente el CHi (Tabla 3). El peso específico, relacionado con la pared celular y la cantidad de espacios libres en la madera, determina la cantidad de agua en las cavidades de las células, de modo que

un alto peso específico produce un menor almacenaje de agua en las cavidades celulares, y por ende un menor contenido de humedad (Simpson, 1999). Dicha relación, explicaría la correlación negativa entre el peso específico y el CHI en la madera de *A. mangium* (PEB=0.45).

En especies de plantaciones de los climas tropicales de América Central se ha señalado que el CHI está relacionado estadísticamente con la distancia de la médula (Muñoz y Moya, 2008, Ofori y Brentuo, 2005), no obstante en la madera de *A. mangium* no se presentó esta relación. Este comportamiento por lo general se produce cuando los elementos celulares relacionados al almacenamiento de agua, como los lúmenes de la fibra o los vasos en especies latifoliadas, presentan poca variación en la dirección médula-corteza (Moya et al., 2011b). Ogata et al (2002) menciona que *A. mangium* se caracteriza por presentar poca variación de las dimensiones de las fibras con la distancia relativa a la médula, de modo que no se presenta relación entre el CHI y la distancia relativa.

El duramen por lo general presenta un CHI mayor del que se presenta en la albura (Skkar, 1972), no obstante en el presente estudio se encontró que el porcentaje de duramen no fue significativo en la variación del CHI. Este resultado puede ser explicado por el hecho de que los árboles de *A. mangium* se caracterizan por desarrollar rápidamente y en alta proporción madera de duramen (Moya y Muñoz, 2010). En las trozas utilizadas en el presente estudio fue encontrado un promedio de duramen de 88 %, y un espesor de albura es 2.75 cm (12 % del área de la troza). A pesar de que las trozas presentaban albura, por el tipo de patrón de aserrío aplicado, del cual se obtienen tablas a lo ancho de la troza y luego se desorillan sus lados (Figura 1), la mayoría de las tablas perdieron gran parte de este tipo de madera, por lo que se obtuvieron tablas con un alto porcentaje de duramen. Este proceso de aserrío y las características propias de la especie, tienen la ventaja de que gran parte de las tablas se producen de solo duramen, por lo que se minimizan las diferencias del CHI por el porcentaje de madera de duramen o albura.

Así mismo el análisis de covarianza mostró que este CHI se ve afectado significativamente por el clima, la altura (parte del árbol donde se extrajo la tabla), la interacción entre el clima y altura, y entre el clima y el patrón de corte (Tabla 4). Estos resultados indican que: el CHI promedio para la madera proveniente de los árboles del clima tropical muy húmedo (139%) fue mayor en comparación con la madera del clima tropical húmedo (118%).

Durante la formación de la madera, las células, son afectadas por muchos factores, tales como el sitio, las condiciones ecológicas, el manejo y la genética de la especie (Zobel y Van Buijtenen, 1989). Por lo que es de esperar que las características anatómicas relacionadas con el almacenamiento de agua se vean modificadas. Por ejemplo la madera de *Vochysia guatemalensis* también creciendo en Costa Rica (Moya et al, 2011b) mostró que el CHI varía según el clima donde crece el árbol, de modo que este mismo comportamiento podría explicar la variación del CHI entre climas para *A. mangium*.

Fue encontrado que en las tablas provenientes de la base del árbol (altura A de este estudio) el CHI (131.1 %) es más alto en comparación con las tablas de la troza de 2.5 a 5.0 m de altura, o troza B (122.2 %), no obstante debido a que la interacción entre clima-altura fue estadísticamente significativa, el comportamiento del CHI en las dos altura estudiadas es diferente en cada una de las zonas (Figura 2a). En la zona muy húmeda no existe diferencia significativa entre las dos alturas estudiadas, mientras que para la zona húmeda las tablas provenientes de la altura A o basales presentan un CHI significativamente mayor (127%) que las tablas de la zona alta o B (107%). Otro aspecto importante de destacar es que el CHI de las tablas de la altura A no presentan diferencias entre los dos tipos de clima. La madera de *A. mangium* presenta una variación del CHI con respecto a la altura, con CHI que varían de 88 a 140 % en la zona basal y que luego disminuyen de 52 a 95 % cerca de la primera rama (Hon, 1984; Moya y Muñoz, 2010). La variación en altura de las propiedades de los árboles es común y es producto de diferentes requerimientos de agua en los procesos fisiológicos que se producen en las diferentes alturas del tronco (Zobel y Van Buijtenen, 1989). Este comportamiento fue encontrado únicamente en las tablas de la zona húmeda. Los árboles de las dos regiones tienen condiciones de altura y diámetro muy diferentes (Tabla 1), por lo que dichos factores u otros no considerados en este estudio pueden estar alterando el comportamiento de la madera de la zona muy húmeda.

La relación del CHI entre clima y patrón de corte es mostrada en las figuras 2c y 2d. Las tablas provenientes de los árboles de la zona muy húmeda presentan CHI mayores en comparación con los de la zona húmeda. Al analizar los diferentes patrones de corte con el tipo de clima se tiene que en la zona muy húmeda solo existieron diferencias significativas entre las tablas con corte 1 (tangencial) y corte 3 (oblicuo) (Figura 2c). Sin embargo, para la zona húmeda no existieron diferencias significativas entre los patrones de corte (Figura 2d).

Contenido de humedad final (CHf)

El programa de secado de baja humedad tuvo una duración de 330 horas, mientras que para el secado de alta humedad el tiempo de secado fue de 349 horas. En ambos programas de secado se presentó un CHf promedio fue de 19% con una variación de 9 a 52%, lo cual demuestra que con los programas de secado utilizados la madera seca de *A. mangium* produce poca uniformidad en el CHf. Altos CH luego del secado han sido señalados por Moya et al (2011a) para la especie, con valores de CHf promedio de 17 % en madera proveniente de plantaciones de 9 años. La variación del CHf ha sido sujeto de estudio en muchas especies, por ejemplo, para *G. arborea* fue reportada una variabilidad de entre 10 y 36% (Moya y Muñoz, 2008), en tanto para *V. guatemalensis* se presentan valores de entre 10 y 24% con un promedio de 12% (Moya et al. 2011b). En ambos casos CHf más bajos que el presentado para *A. mangium*.

La variación del CHf de la madera está presente en todo proceso de secado, no obstante esta debe ser minimizada para mejorar la estabilidad de la madera y la calidad del producto final. Esta falta uniformidad en el CHf puede tener un impacto significativo en el procesamiento secundario de la madera y en el desempeño final del producto (Gu et al, 2004). Se considera un secado satisfactorio, cuando el promedio de CHf presenta una variación de $\pm 1\%$ (Simpson, 1999). De este modo se confirma que *A. mangium* es una especie con dificultades para lograr un CHf satisfactorio. Otras especies tropicales como *G. arborea*, *V. guatemalensis* y *C. odorata* concuerdan con los resultados obtenidos para *A. mangium*, donde el CHf es afectado por el CHI, el peso específico, la distancia de la médula y la presencia de cortes radiales en la tabla (Muñoz y Moya, 2008; Moya et al, 2011b; Ofori y Brentuo, 2005).

El análisis de correlación de los efectos aleatorios mostró que el CHf presentó una correlación positiva significativa con CHI, el porcentaje de madera radial presente en las tablas y con el porcentaje de bolsas de humedad (porcentaje de área de la bolsa de humedad), en tanto que el peso específico y la distancia relativa de la médula fueron negativamente correlacionados (Tabla 3). Las relaciones con el primer grupo de factores tienden a producir un mayor CHf del que fue programado en el programa de secado, mientras que el segundo grupo ocurre el efecto contrario, tiende a obtenerse madera de menor CHf que el programado en el secado.

La madera de *A. mangium* es característica por poseer altos CHI, “madera húmeda” y de alta variación (Yamamoto et al., 2003). Estos aspectos provocan un proceso de secado más extenso e irregular y dan origen a CHf por encima del contenido de humedad programado, usualmente

superiores al 19 % (Ward, 1986). Dichos comportamientos se vieron reflejados en el alto valor y variabilidad del CHF en madera seca de *A. mangium*. Así mismo, el porcentaje de madera con cortes radiales tiende incrementar el CHF de la madera seca, ello porque el flujo del agua a través de las fibras es mucho más lento en este corte (Sattar et al., 1991). El efecto en el CHF de las bolsas de humedad se detalla ampliamente en el apartado de bolsas de humedad más adelante. El incremento del peso específico disminuye el CHF. Dicho comportamiento puede ser explicado por el hecho de que un alto peso específico reduce la cantidad de espacios libres, de modo que se obtiene una menor humedad, lo que favorece el proceso de secado. La distancia relativa a la médula presenta una correlación negativa con el CHF, es decir, que las tablas cercanas a la médula presentan CHF altos en relación a las otras partes de la sección radial de la troza. En este sentido es importante hacer notar que el CHI es uniforme en sentido radial, pero al finalizar el proceso de secado se produce una variación en la velocidad de secado de cada una de las piezas en diferentes partes de la distancia de la médula, lo cual produce una variación en el CHF de la madera. Estos cambios en la velocidad de secado pueden ser debidos a una variación en la anatomía de la madera, a flujos de agua irregulares, entre otros aspectos que no fueron considerados en el presente estudio (Simpson, 1991)

En el análisis de covarianza mostró que el CHF es afectado significativamente por la altura de la troza dentro del árbol, el tipo de secado y la interacción de ambas variables (Tabla 4). El CHF fue estadísticamente más alto en las tablas sometidas al secado de baja humedad que en las tablas del secado de alta humedad (Figura 2b). Al analizar la variación en las dos alturas evaluadas, se tiene que el secado de baja humedad no presentó diferencias entre las alturas, contrario el secado de alta humedad, que sí presentó diferencias en las alturas (Figura 2b). Al igual que como sucedió con el CHI, la diferencia en este valor por la altura puede ser explicado por los diferentes procesos fisiológicos que se producen en las diferentes alturas del tronco de los árboles (Zobel y Van Buijtenen, 1989).

Tabla 3. Coeficientes de correlación y significancia de las variables continuas evaluadas en el contenido de humedad, el color y en el porcentaje de contracción en la madera de *A. mangium*.

Factor	CHi	CHf	L* antes	a* antes	b* antes	L* después	a* después	b* después	ΔE^*	% Contracción por ancho	% Contracción por espesor
CHi	NC	0,226*	-0,197	-0,419**	-0,221*	0,141	-0,392**	0,019	0,213	NC	NC
CHf	NC	NC	0,082	0,017	-0,067	0,013	-0,145	0,203	0,041	-0,270**	-0,040
% Duramen	0,05	0,203	-0,035	0,049	0,004	-0,058	-0,002	0,021	-0,004	0,060	-0,010
% Radial	0,019	0,423**	0,183	0,055	0,229*	0,05	-0,087	0,059	-0,145	-0,160*	0,050
Peso específico	-0,583**	-0,222*	0,062	0,106	0,104	-0,142	0,329**	-0,063	-0,192	0,100	-0,240**
Distancia relativa	-0,139	-0,274*	-0,221*	-0,068	-0,18	-0,224	0,159	0,026	0,201	0,230**	-0,160*
% de Bolsa de humedad	NC	0,427**	0,069	0,082	0,133	0,220*	0,101	0,063	-0,128	NC	NC
Coef. Difusión Radial	NC	0,255*	NC	NC	NC	0,013	-0,213	-0,06	-0,054	-0,010	0,270**
Coef. Difusión Tangencial	NC	0,187	NC	NC	NC	0,034	-0,179	-0,084	0,024	0,010	0,180*
% Contracción Tangencial	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	0,020	0,250**
% Contracción Radial	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	-0,130	-0,040

Nota: NC = no considerado en el modelo, CHi = contenido de humedad inicial, CHf = contenido de humedad final, ΔE = cambio de color, * Estadísticamente significativo a $\alpha=0.05$, ** estadísticamente significativo a $\alpha=0.01$.

Tabla 4. Valores F del análisis de covarianza para el contenido de humedad, el color y el porcentaje de contracción en la madera de *A. mangium* (N=216).

Fuente de variación	Contenido de humedad		Color antes			Color después			Cambio de color	% de Contracción	
	CHi	CHf	L*	a*	b*	L*	a*	b*		Ancho	Espesor
Clima	24,51**	2,99	0,06	6,91**	0,34	0,04	19,39**	8,26**	0,44	12,15**	0,28
Altura	14,57**	5,81*	16,88**	15,38**	4,36*	11,20**	4,74*	11,98**	3,38	4,91	0,68
Patrón de corte	0,69	1,01	2,4	0,98	0,64	2,62	1,53	0,75	2,2	0,31	1,15
Tipo de secado	NC	149,21**	NC	NC	NC	14,52**	0,02	1,33	0,01	1,09	8,32**
Clima*Altura	15,81**	0,09	0,77	0,15	0,57	0,18	1,08	0,54	0,81	3,89	0,30
Categorías Clima *Patrón de corte	2,66*	0,74	0,27	0,5	0,5	1,65	0,36	0,55	1,51	0,52	1,69
Clima *Tipo de secado	NC	0,89	NC	NC	NC	3,22	0,96	0,03	4,60*	1,32	0,80
Altura*Patrón de corte	0,83	0,51	2,67*	1,86	2,19	1,54	0,91	2,23	1,03	1,81	0,41
Altura*Tipo de secado	NC	14,08**	NC	NC	NC	3,04	1,62	0,47	0,61	0,64	0,46
Patrón de corte*	NC	1,82	NC	NC	NC	1,88	0,15	0,85	0,85	1,24	1,36
Tipo de secado											
Peso específico	24,64**	0,5	NC	NC	NC	NC	0,09	NC	NC	NC	0,02
Distancia relativa	NC	2,55	0,88	NC	NC	NC	NC	NC	NC	6,51*	0,88
% Radial	NC	1,56	NC	NC	0,96	NC	NC	NC	NC	0,02	NC
CHi	NC	0,3	NC	0,16	NC	NC	0,04	NC	NC	NC	NC
CHf	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	3,85	NC
% de Bolsas de Humedad	NC	59,76**	NC	NC	NC	1,39	NC	NC	NC	NC	NC
% Contracción Tangencial	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
Coef. Difusión Tangencial	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	18,64**
Coef. Difusión Radial	NC	0,04	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	2,40

Nota: NC = no considerado en el modelo, CHi = contenido de humedad inicial, CHf = contenido de humedad final, ΔE = cambio de color, * Estadísticamente significativo a $\alpha=0.05$, ** estadísticamente significativo a $\alpha=0.01$.

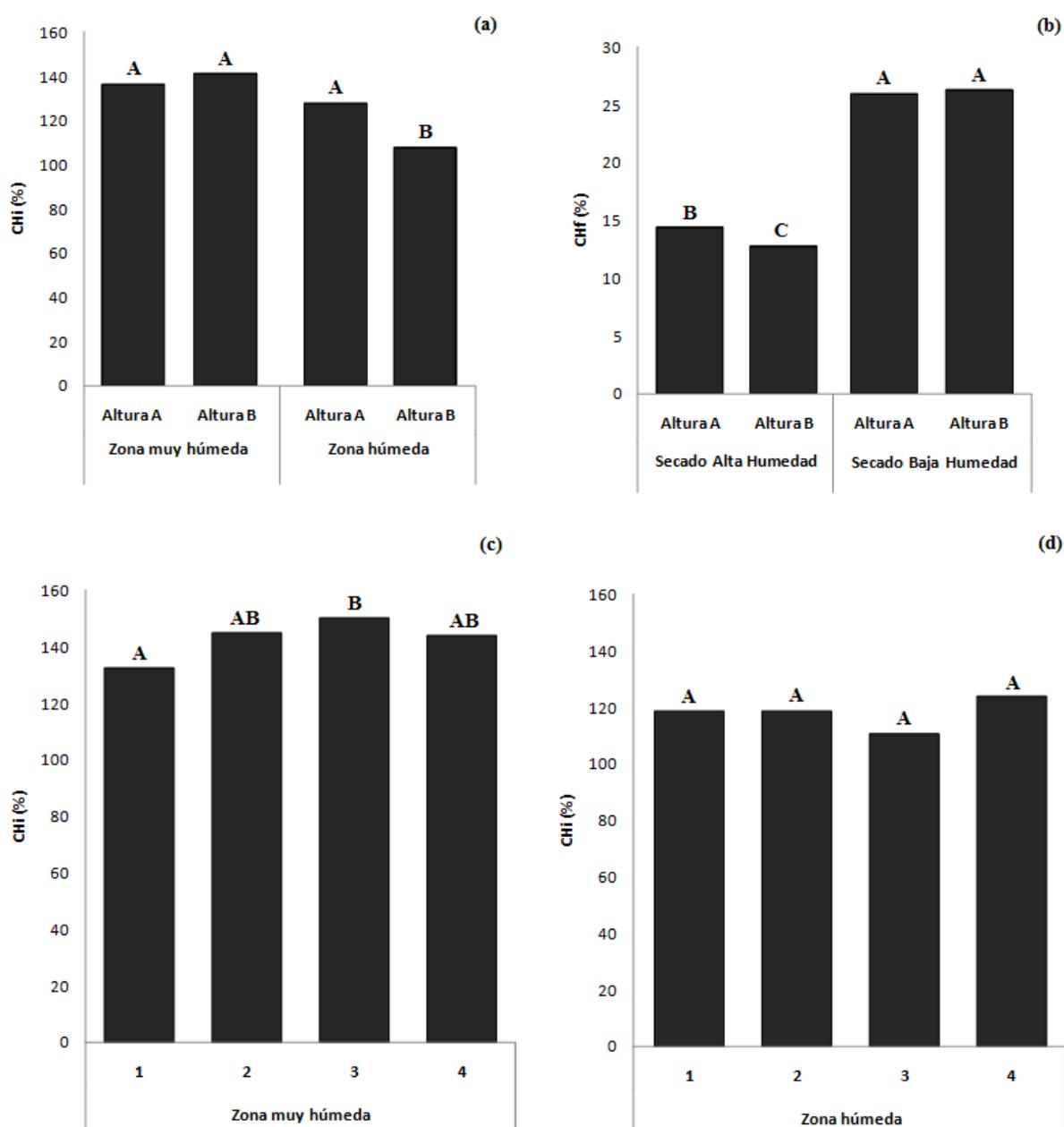


Figura 2. Factores que afectan el contenido de humedad inicial y final en madera de *A. mangium*.

Nota: las letras encima de las barras indican que los valores son estadísticamente diferentes a un nivel de confianza de 95%. (c) 1 = patrón de corte tangencial, 2 = patrón de corte radial, 3 = patrón de corte oblicuo y 4 = patrón de corte combinado.

Bolsas de humedad

Unos de los factores de importante influencia en el CHF fue el desarrollo de bolsas de humedad en la madera seca, lo cual indica que la especie es propensa a la producción de estas durante el proceso de secado. En la madera seca de *A. mangium* se encontró que

un 64% del total de las tablas evaluadas en los dos programas de secado (216) presentaban bolsas de humedad.

Las bolsas de humedad son conocidas también como bolsas de agua, en donde se presentan contenidos de humedad superiores al deseado (Simpson, 1991). Las bolsas de humedad en la madera seca de *A. mangium* se pueden observar transversalmente y en todo lo largo de la tabla y se caracterizan por poseer un color más oscuro donde se concentra la humedad en comparación con la región de la tabla que se encuentra seca (Figura 3). Al evaluar el contenido de humedad en la región dentro y alrededor de la bolsa de humedad se encontró que dentro de la bolsa de humedad el CH fue de 25 % (12 a 76 %), mientras que en la parte externa o alrededor el promedio fue de 16 % (12 a 22 %). Así mismo fue encontrado que el área de promedio en la sección transversal que ocupa la sección con bolsas de humedad fue de 23 %. Las bolsas de humedad han sido reportadas en madera seca de otras especies de plantación en Costa Rica tales como *G. arborea* y *V. guatemalensis* (Moya y Muñoz, 2008; Moya et al, 2011b) y la variación del contenido de humedad en la bolsa también es alta, como ocurre en *A. mangium*. *G. arborea* reporta una variación de 40 a 100 % (Moya y Muñoz, 2008) y *V. guatemalensis* de 15 a 35 % (Moya et al, 2011b).



Figura 3. Bolsas de humedad presentes en madera seca de *A. mangium*.

Al evaluar los factores que afectan el desarrollo de estas bolsas de humedad, por medio de regresión logística, se encontró que los árboles del clima 1 (zona muy húmeda), del secado de baja humedad, y de las tablas con tipo de corte combinado o tipo 4 presentan altas probabilidades (Valor $P < 0,05$) de desarrollar bolsas de humedad (Tabla 5).

Tabla 5. Regresión logística y estimadores sobre la probabilidad de la presencia de bolsas de humedad en la madera de *A. mangium*.

Variable	Nivel de efecto	Grados de libertad	Estimado	Error estándar	Estadístico Wald	Valor p
Intercepto		1	-0,02	1,01	0,00	0,98
Clima	Zona muy húmeda	1	0,29	0,11	6,81**	0,01
Altura	A	1	-0,16	0,11	2,13	0,14
Tipo de secado	Baja humedad	1	0,34	0,11	9,26**	0,00
Tipo de corte	Tangencial	3	0,83	1,00	0,70	0,40
	Oblicuo		0,54	0,33	2,70	0,10
	Combinado		0,83	0,28	9,12**	0,00
Distancia relativa		1	-0,02	0,01	10,45**	0,00
% Radial		1	0,04	0,02	3,17	0,08
Escala			1,00	0,00	0,00	0,98

La distribución del contenido de humedad dentro o fuera de las bolsas de humedad, es mostrado en la figura 4, se presenta el efecto del clima y tipo de corte sobre el desarrollo de bolsas de humedad. En esta figura es posible observar que: (i) las bolsas se concentraban principalmente en las tablas con corte radial (70% del total de las tablas), (ii) las tablas provenientes de las zonas muy húmedas presentaban los contenidos de humedad más altos; mientras que las tablas de las zonas húmedas, además de presentar contenidos de humedad más bajos dentro de las bolsas presentaban una mayor cantidad de tablas, 61 de 97 tablas radiales, (iii) el patrón de corte 4 (combinado) se presenta el mayor número de bolsas de humedad, (iv) las tablas provenientes de la zona muy húmeda fueron las que presentaron contenidos de humedad dentro de las bolsas más altos en las tablas tangenciales (24 %).

Estudios realizados en *G. arborea* y *V. guatemalensis* de plantaciones de rápido crecimiento (Moya y Muñoz, 2008; Moya et al, 2011b), al igual que *A. mangium*, concuerdan en que la madera con cortes radiales, como los cortes combinados, radial o central son los más propensos a desarrollar bolsas de humedad. No obstante, el desarrollo de las bolsas de humedad en madera seca es aún poco conocido. Por ejemplo, Moya y Muñoz (2008) señalan dos posibles explicaciones para la formación de bolsas de humedad en la madera seca: (1) al inicio del proceso de secado las punteaduras tienden a producir fuerzas capilares de alta magnitud provocando la aspiración del margo en las secciones radiales, sin permitir el flujo normal del agua, y (2) el

movimiento del agua en la sección radial de las tablas se produce principalmente por la punteaduras de las fibras las cuales son escasas y diminutas, lo cual tiende a producir un ritmo de difusión más lento. Así mismo, otros estudios señalan que la formación de bolsas de humedad está relacionado a la “madera húmeda” (Ward, 1986; Simpson, 1991), la cual es originada por la invasión de una bacteria anaeróbica en el duramen de árboles vivos (Ward, 1984). Este tipo de madera provoca lentas velocidades de secado y baja permeabilidad producto de las aspiraciones del margo en las puntuaciones de las fibras (Ward, 1986; Jeremic et al., 2004). Este tipo de madera fue señalado por Yamamoto et al (1997, 2003) en el duramen de *A. mangium*. Así mismo muchas investigaciones ha mostrado que en esta especie se presenta un tipo de pudrición del duramen en el árbol que dentro de otras cosas afecta su estructura anatómica así como otros componentes en la madera (Barry et al., 2004, Barry et al., 2006, Lee et al., 1997) y que junto con la presencia de madera húmeda pueden estar ayudando a la formación de bolsas de humedad.

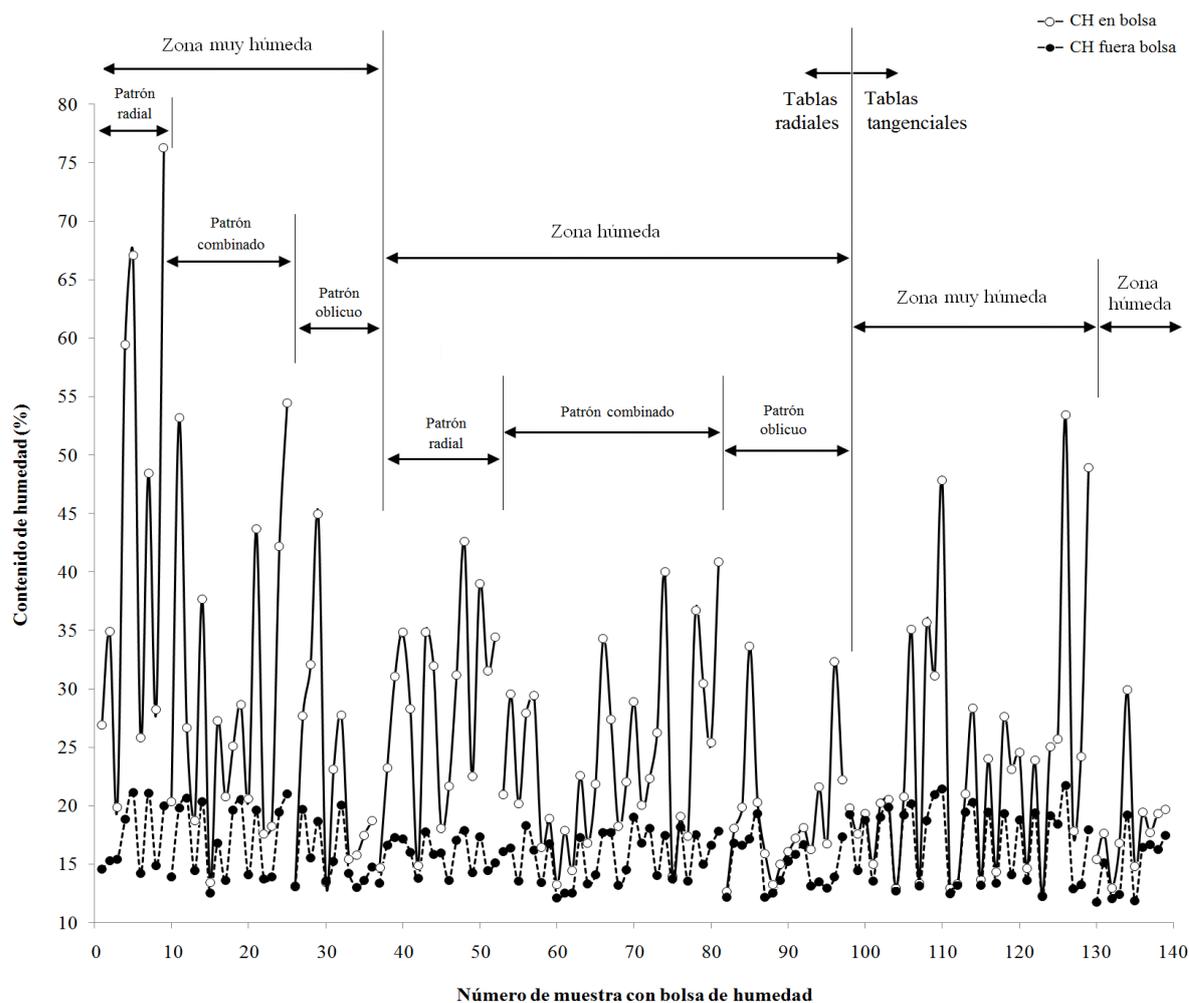


Figura 4. Contenido de humedad de las piezas que presentaron bolsas de humedad por clima y por la ubicación de la bolsa por tipo de corte radial y tangencial en madera de *A. mangium*.

Color

Los tres parámetros de color del duramen aumentaron significativamente luego del secado en relación a los valores que presentaban antes del secado (Figura 5a). El parámetro L^* aumentó de 37.39 (21.18 - 61.53) a 46.10 (31.58 - 69.37), a^* de 6.86 (1.07 - 13.50) a 8.98 (4.09 - 15.04) y finalmente b^* de 16.21 (5.93 - 29.64) a 24.67 (17.36 - 46.17). Estos valores indican que el color del duramen de *A. mangium* es una combinación de tonos blancos, rojos y amarillos. Visualmente este tipo de madera es catalogada por algunos investigadores como de color marrón amarillento a marrón dorado en condición verde, y marrón mate en madera seca (Sahri et al., 1993).

El cambio de color que sufre la madera luego del secado puede ser cuantificado, por medio del ΔE^* y acorde a sus valores puede ser catalogado en 5 diferentes niveles de

percepción al ojo humano (Cui et al, 2004): (i) cuando ΔE^* varía de 0 a 1.5, el cambio de color no es catalogado como apreciable, (ii) cuando ΔE^* se encuentra entre 1.5 a 3.0, es apenas apreciable en la superficie, (iii) cuando el rango varía de 3.0 a 6.0, el cambio es apreciable, (iv) cuando ΔE^* varía de 6.0 a 12.0, el cambio de color es muy notable y (v) finalmente, cuando ΔE^* es superior a 12 se cataloga como un cambio de color total. Para este estudio, considerando estos niveles de cambio de color se tiene que durante el secado de la madera *A. mangium* el 1% de la totalidad de tablas secadas sufrieron un cambio de color apenas apreciable, el 9% con un cambio apreciable, el 31% con un cambio notable y finalmente el 59% el cambio de color fue completo (Figura 5b).

Keey (2005) menciona que los cambios en el color de la madera por el secado ocurren por la evaporización del agua en la superficie de la tabla, la cual contiene extractivos disueltos con azúcares de bajo peso molecular y compuestos nitrogenados como las proteínas, produciendo un cambio en la composición química de la superficie, generando melaninos, y evidenciando un color más marrón en la mayoría de los casos. Estudios realizados en otras especies han mostrado cambios en la coloración de la madera por el secado.

El análisis de correlación de las variables aleatorias mostró que antes del secado L^* tiene una correlación negativa significativa con la distancia de la médula, a^* también presentaba una correlación negativa con el CHI y el parámetro b^* negativa con el CHI y positiva con el porcentaje de madera radial en la tabla (Tabla 3). En tanto que después del secado L^* fue afectado positivamente con el porcentaje de bolsas de humedad, a^* positivamente afectado por el peso específico básico y negativamente con el CHI (Tabla 1) y finalmente b^* no fue afectado significativamente por ningún factor. No obstante, estos efectos aleatorios desaparecen (son estadísticamente no significantes) cuando se presentan los efectos controlados establecidos en este estudio (Tabla 4).

El análisis de covarianza mostró que el parámetro L^* antes del secado fue afectado significativamente por la altura de donde se extrajo la troza en el árbol y por la interacción entre la altura y el patrón de corte, a^* por el clima y por la altura, y b^* por la altura. Después del secado L^* fue afectado por la altura y el tipo de secado, a^* continuo siendo afectado por las mismas variables que lo afectaron antes del secado, y el parámetro b^* mantenía el efecto significativo de la altura junto con el clima (Tabla 4).

De los anteriores resultados se deduce que el factor que tiene más influencia los parámetros de color antes y después del secado es la altura. El grado de cambio de color medido por ΔE^* no presentó relación estadísticamente significativa con alguna variable aleatoria (Tabla 3) y de las variables controladas, el ANCOVA mostró que el cambio de color fue solamente afectado significativamente por la interacción entre el clima y el tipo de secado (Tabla 4). Esta interacción da como resultado que en el secado de baja humedad el cambio de color en la madera fue de la misma magnitud en los dos tipos de clima, pero en el secado de alta humedad, la madera proveniente de la zona muy húmeda presenta una magnitud de cambio de color (ΔE^*) estadísticamente mayor que la madera de la zona húmeda (Figura 5c).

El cambio de color de la madera es influenciado por diversos factores, unos relacionados a factores propios del árbol, como al sitio de donde proviene la madera, al manejo, la genética y la edad del árbol (Phelps et al., 1983), y otros relacionados al proceso de secado de la madera (Möttönen et al., 2002; Aguilar et al., 2009). En el primer grupo de factores el sitio es una de las principales fuentes de variación del color antes y después del secado (Gierlinger et al., 2004; Moya y Berrocal, 2010). Los resultados obtenidos en *A. mangium* concuerdan con este comportamiento, ya que el sitio afectó estadísticamente los parámetros de color antes y después de secado (Tabla 4). Los parámetros de color están relacionados con la presencia de extractivos en la madera (Burtin et al., 1998) y específicamente se ha encontrado que L^* está relacionado con la cantidad de extractivos en la madera (Gierlinger et al., 2004). En *A. mangium* se ha demostrado que la cantidad de extractivos varían con la altura del árbol (Taylor et al., 2002), de modo que la variación de los extractivos puede estar influenciando los cambios de color en las dos alturas estudiadas. Así mismo los cambios de color debido al patrón de corte ocurren porque existen diferencias de color entre las superficies radiales y las tangenciales, lo cual puede atribuirse como una diferencia de apariencia, producto de características anatómicas, tales como la disposición de las células, la existencia de radios anchos y los granos entrecruzados (Nishino et al., 1998).

Un aspecto importante de destacar de los anteriores resultados es que los factores que afectan los parámetros individuales del color no poseen influencia en el cambio de color (ΔE^*) de la madera (Tabla 4). En este sentido se establece que el cambio de color de la superficie de la madera se debe a la eliminación del agua y al movimiento de extractivos

de la parte interna a la externa o a la oxidación de estos en la superficie (Keey, 2005), por lo que la variación de los extractivos en altura y las diferentes temperaturas utilizadas en los dos secados produjeron cambios de color en diferentes magnitudes, dando como resultado la interacción entre altura y tipo de secado en ΔE^* .

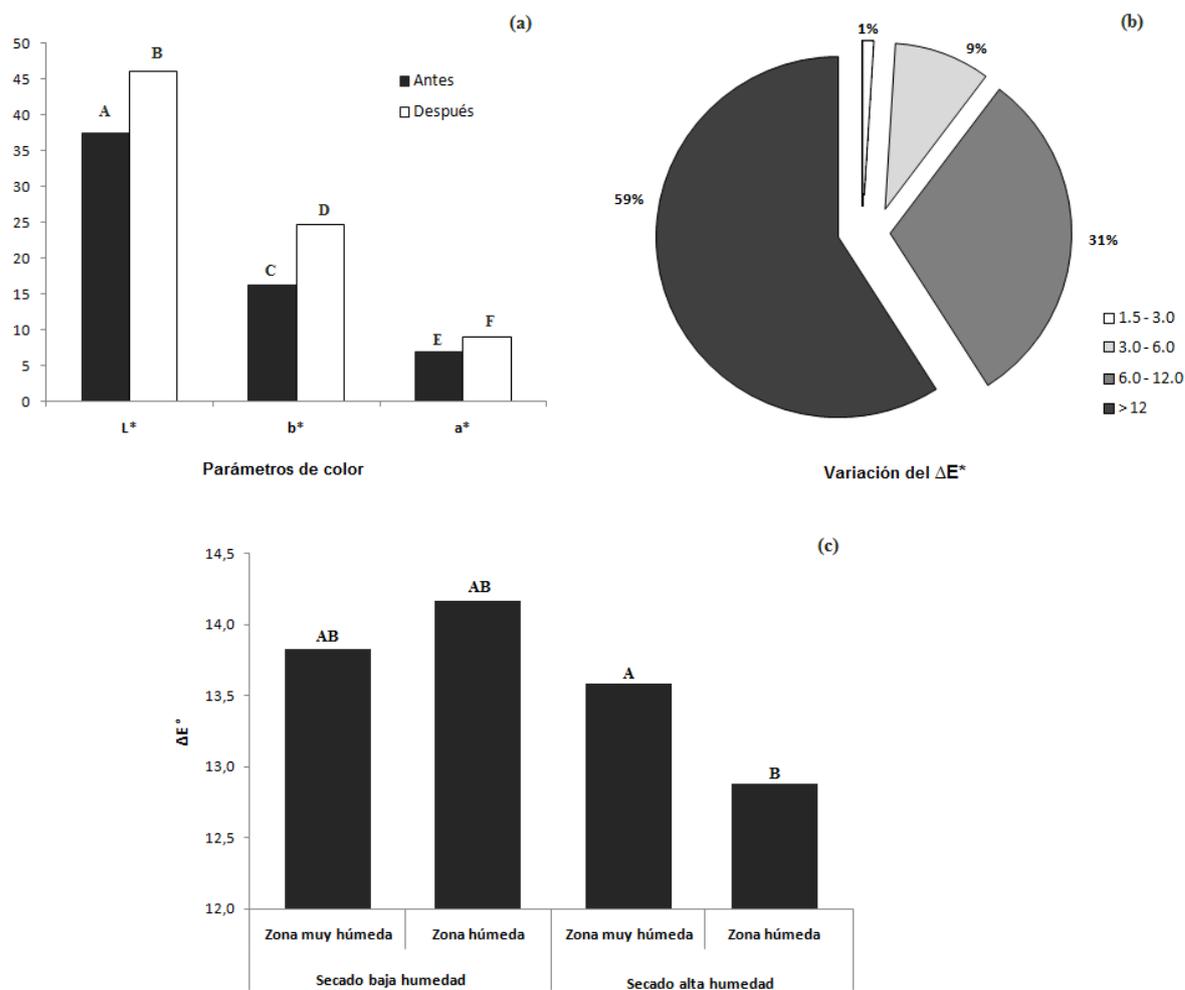


Figura 5. Parámetros de color en madera de *A. mangium* antes y después del secado (a), niveles de variación del ΔE^* (b) y comportamiento del ΔE^* por tipo de secado y clima. Nota: las letras encima de las barras indican que los valores son estadísticamente diferentes a un nivel de confianza de 95%.

Defectos de secado

El alabeo, encorvadura, arqueadura, grietas y rajaduras son los defectos presentes en la madera aserrada de *A. mangium* antes del secado; siendo los de más alta incidencia la encorvadura y el alabeo, con valores superiores a 65% del total de tablas (Figura 6a). La

acanaladura no se presentó en las tablas antes del secado (Figura 6a). Luego del proceso de secado se aumento la incidencia de tablas con alabeo, arqueadura, grietas y rajaduras. Sin embargo, la encorvadura disminuyó, esto posiblemente como consecuencia de que las tensiones del secado se oponen y contrarrestan las tensiones de crecimiento liberadas durante el aserrío de las trozas (Serrano y Cassens, 2001).

A pesar de que en general se observa un aumento en la cantidad de tablas con defectos luego del secado, en el momento de clasificar estos defectos se encontró 3 tipos de magnitudes: (1) aumento del defecto, (2) disminución del defecto y (3) el defecto no aumento o disminuyó en magnitud. La evaluación de las tablas en estas 3 categorías mostró que: las grietas se mantuvieron sin cambios después del secado, el alabeo, la encorvadura y la acanaladura entre el 40-50% de las tablas se mantuvieron sin cambios en los defectos (Figura 6b), sin embargo para la encorvadura y acanaladura en el otro 50% de las tablas ocurrió un aumento de los defectos (Figura 6b). En tanto que la arqueadura y rajaduras disminuyó la cantidad de tablas con este defecto luego del secado (Figura 6b).

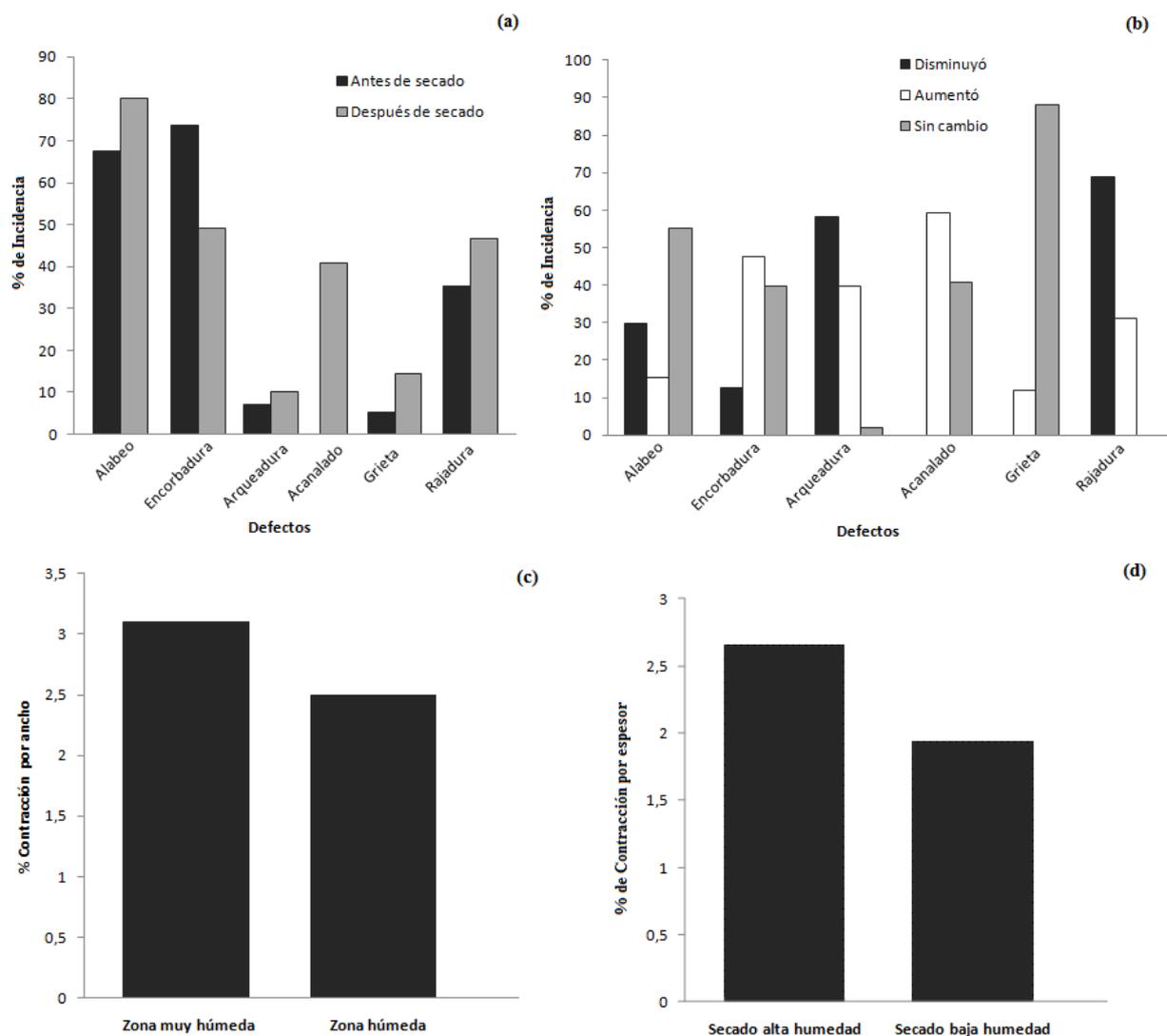


Figura 6. Porcentaje de incidencia de los defectos de secado antes y después del secado (a), magnitud de la incidencia de los defectos (b), contracción en ancho por procedencia (c) y contracción en espesor por tipo de secado en tablas de madera de *A. mangium*.

La clasificación de los defectos en 4 categorías según su magnitud (NIST, 2005) mostró que en el alabeo, grietas y rajaduras antes y después del secado junto con las encorvaduras antes del secado, un alto porcentaje de las tablas se catalogaron sin defectos, y cuando el defecto estaba presente, estos se categorizan como leves, a excepción de la encorvadura que presenta un alto porcentaje de tablas con defecto severo (Tabla 6). Entre el 62-70 % de las tablas con arqueadura antes y después del secado se clasifican como severas. El 100 % de las tablas antes del secado no

presentaban acanaladura, pero luego del secado si se presentó este defecto pero catalogado como leve (Tabla 6).

Si bien el porcentaje de incidencia de tablas con defectos aumento después del secado, muchas de las tablas que ya presentaban algún tipo de defecto se mantuvieron sin cambios en las dimensiones de dichos defectos, y muy pocos aumentaron de magnitud. Lo anterior significa que aunque la madera aserrada de *A. mangium* durante el proceso de aserrío produce defectos como alabeo, encorvaduras y rajaduras, estas son de tipo leve o sin defectos, muchos de los cuales al secar la madera aumentan pero son considerados como leves. Sin embargo, los defectos de encorvadura y arqueadura son de tipo severo después de secado. El acanalado en tablas anchas no se presentan antes del secado, pero al secar la madera este defecto está presente, pero es catalogado como defecto leve (Tabla 6).

Los resultados mostrados anteriormente concuerdan con los encontrados para *A. mangium* por Lim et al, (2003) el cual señala que la madera de dicha especie posee la tendencia a presentar defectos como colapso, encorvaduras, arqueaduras, nudos y contracciones en sentido radial y tangencial. Así mismo otras especies tropicales (Moya et al, 2011b) se caracterizan por la presencia de defectos antes y después del secado, con los valores son similares a los obtenidos en este estudio para *A. mangium*.

Tabla 6. Porcentaje de piezas encontradas por categoría de defectos en madera antes y después del secado de *A. mangium*.

Tipo de defecto	Condición	Sd	L	M	S
Alabeo (mm)	Antes	67,59	0	27,31	5,09
	Después	80,09	14,35	4,63	0,93
Encorvadura (mm)	Antes	49,07	3,24	9,72	37,96
	Después	24,07	0,93	4,17	45,83
Arqueadura (mm)	Antes	6,94	4,63	18,52	69,91
	Después	10,19	5,56	22,22	62,04
Acanalado (mm)	Antes	100	0	0	0
	Después	0	92,59	34,72	5,56
Grieta (mm)	Antes	94,91	3,24	0,93	0,00
	Después	85,65	14,35	2,78	1,39
Rajadura (mm)	Antes	64,81	21,76	6,02	7,41
	Después	53,24	31,02	6,02	9,72

Rangos para alabeo: Sd=sin defecto (0 mm), Leve (1-5 mm), Moderado (5-8 mm) y Severo (sobre 8 mm)

Rangos para encorvadura: Sd=sin defecto (0 mm), Leve (1-2 mm), Moderado (2-3 mm) y Severo (sobre 3 mm)

Rangos para arqueadura: Sd=sin defecto (0 mm), Leve (1-3 mm), Moderado (3-6 mm) y Severo (sobre 6 mm)

Rangos para acanalado: Sd=sin defecto (0 mm), Leve (1-3 mm), Moderado (3-5 mm) y Severo (sobre 5 mm)

Rangos para grieta: Sd=sin defecto (0 mm), Leve (1-10 mm), Moderado (10-25 mm) y Severo (sobre 25 mm)

Rangos para rajadura: Sd=sin defecto (0 mm), Leve (1-25 mm), Moderado (25-42 mm) y Severo (sobre 42 mm)

El estudio de los factores controlados que afectan el desarrollo de defectos en las tablas mostró que en la encorvadura y las rajaduras antes y después del secado y el acanalado después del secado, son significativamente afectados por el tipo de clima de donde proviene la madera. Las arqueaduras, grietas y rajaduras después del secado son afectadas significativamente por el tipo de secado. El patrón de corte afecta igualmente al acanalado después del secado y a las rajaduras antes y después del secado (Tabla 7). En conclusión la incidencia de defectos en la madera *A. mangium* se ve afectada por el proceso de secado, el clima y el patrón de corte que presenta la madera.

La industrialización de la madera de árboles de cortas edades, como en este caso de los árboles de *A. mangium*, son propensas a producir alta incidencia de defectos de alabeo, arqueadura y encorvadura, esto debido a que se presentan una alta proporción de madera juvenil, la cual se caracteriza por la presencia de altos niveles de tensiones de crecimiento (Zobel, 1984; Simpson, 1991; Zobel y Sprague, 1998). Por lo tanto es de esperar que la madera de *A. mangium* presente este tipo de defectos.

El secado de la madera de *A. mangium* como fue explicado anteriormente, aumenta la incidencia de algunos defectos, no obstante estos defectos a excepción de las rajaduras y las grietas no son afectados por los dos tipos de programas de secado utilizados. No

obstante, esto debe ser tomado con cautela ya que los dos programas utilizados no poseen diferencias extremas, esto debido a que el desarrollo de los defectos está muy relacionado con la velocidad de secado que se quiera aplicar a la madera (Simpson, 1991).

Tabla 6. Valor F del análisis de varianza para los índices de calidad en madera aserrada antes y después del secado de *A. mangium* (N=216).

Fuente de variación	Condición	Tipo de secado	Clima	Altura	Patrón de corte
Alabeo (mm)	Antes	-	0,38 ^{NS}	0,00 ^{NS}	2,10 ^{NS}
	Después	3,06 ^{NS}	0,41 ^{NS}	0,00 ^{NS}	2,26 ^{NS}
Encorvadura (mm)	Antes	-	9,98 ^{**}	1,03 ^{NS}	0,92 ^{NS}
	Después	2,58 ^{NS}	10,59 ^{**}	1,09 ^{NS}	0,97 ^{NS}
Arqueadura (mm)	Antes	-	0,00 ^{NS}	0,02 ^{NS}	1,22 ^{NS}
	Después	11,88 ^{**}	0,00 ^{NS}	0,02 ^{NS}	1,73 ^{NS}
Acanalado (mm)	Antes	-	0,00 ^{NS}	0,00 ^{NS}	0,00 ^{NS}
	Después	3,82 ^{NS}	15,14 ^{**}	0,81 ^{NS}	3,25 [*]
Grietas (mm)	Antes	-	0,34 ^{NS}	0,78 ^{NS}	1,25 ^{NS}
	Después	5,05 ^{**}	0,11 ^{NS}	1,34 ^{NS}	0,88 ^{NS}
Rajaduras (mm)	Antes	-	7,91 ^{**}	0,47 ^{NS}	4,49 [*]
	Después	14,95 ^{**}	11,62 ^{**}	0,97 ^{NS}	10,60 ^{**}

Legenda: **estadísticamente significativa a 99%, *estadísticamente significantes a 95% y NS=no significantes.

Nota: Las interacciones de las variables fueron eliminadas ya que en ningún caso fueron estadísticamente significantes.

Contracciones de la madera

Las contracciones de la madera fueron en promedio de 2.30 % (0 – 9.58 %) para el espesor y de 2.77 % (0 – 21.54 %) para el ancho. El análisis de correlación de las variables no controladas mostró que la contracción en ancho se encuentra relacionada negativamente con el CHF y el porcentaje de madera radial, en tanto que la distancia relativa de la médula tiene un efecto positivo en la contracción del ancho de la tabla (Tabla 3). Al realizar el ANCOVA se mostró que la distancia relativa mantiene el mismo efecto significativo, solo que también es afectado por el clima (Tabla 4). Las tablas provenientes de los árboles que crecen en zonas muy húmedas presentan una contracción en ancho mayor (3 %) a las tablas de árboles creciendo en zonas húmedas (2.5 %) (Figura 6c).

La contracción en espesor de las tablas es relacionada negativamente ($\alpha < 0.05$) con el peso específico y la distancia relativa, en tanto que coeficientes de difusión radial y tangencial del agua y el porcentaje de contracción tangencial se relacionaron positivamente ($\alpha < 0.05$) (Tabla 3). Al considerar estos factores aleatorios y controlados en el ANCOVA se determinó que el coeficiente de difusión tangencial (variable aleatoria) junto con el tipo de secado (variable controlada) afectan significativamente la contracción en espesor (Tabla 4). La contracción en espesor de las tablas secadas bajo el sistema de alta humedad presentan contracciones más altas (2.63 %) en comparación con las tablas sometidas al secado de baja humedad (1.96 %) (Figura 6d). Esta diferencia producida por los dos tipos de secado puede ser explicada por el hecho de que en el secado de alta humedad se presentó un CHF más bajo y una menor incidencia de tablas con bolsas de humedad que el secado de baja humedad, esto porque la contracción está relacionada directamente con el CH a que se seque la madera (Simpson, 1991).

Las contracciones de la madera están relacionadas con la cantidad de pared celular presente en la madera (Zobel y Van Buijtenen, 1989), y el peso específico es un parámetro indirecto para medir esta cantidad de material, que a su vez se encuentra relacionado con la distancia de la médula en el caso de *A. mangium* (Kim et al., 2008), por tanto es de esperar la relación entre contracciones con el peso específico y la distancia de médula (Tabla 4).

Las contracciones de las tablas aserradas, usualmente compuestas de madera radial y tangencial, están influenciadas por las contracciones individuales de los valores de contracción en sentido radial y sentido tangencial y cada una por sí sola presenta valores diferentes entre ellas. Sin embargo en el presente estudio, solamente en el espesor la contracción tangencial afectó las contracciones en la madera seca (Tabla 4). Probablemente los efectos que están produciendo los otros factores variables y controlados influyen en la relación entre el valor de contracción de la tabla y la contracción en los diferentes planos de la madera.

CONCLUSIONES

Acacia mangium presenta un alto CHI y una alta variación, el cual es influenciado por el peso específico básico y al contrario de especies de rápido crecimiento, no varía en la dirección médula-corteza o por la cantidad de albura presente en la tabla. El valor de

CHi de la madera aserrada es influenciado por el clima donde provienen los árboles, la posición en la altura del árbol y tipo de patrón de corte que se aplica en la troza.

La madera *A. mangium* es propensa a producir poca uniformidad en el CHf (9 a 52 %) luego del secado en horno convencional y es influenciado por el CHi, el porcentaje de madera radial, el peso específico básico y la distancia relativa. No obstante, la influencia de estos factores se ven reducidos durante el secado por la altura de la troza dentro del árbol, el tipo de secado y la interacción de ambas variables. Así mismo uno de los principales factores que influyen en la variabilidad del CHf es el desarrollo de bolsas de humedad durante el secado, las cuales son propensas de producirse en madera proveniente de árboles creciendo en climas tropicales muy húmedos, en secados de baja humedad relativa en la cámara y en maderas aserradas con patrones de corte combinados o tipo 4.

Durante el secado de madera de *A. mangium* el duramen cambia de color y los componentes tres componentes del color (L^* a^* b^*) son afectados por factores como clima, altura de la troza y tipo de secado, sin embargo el cambio de color se produjo por tipo de secado aplicado en la madera y el tipo de clima donde crece el árbol.

Los defectos de secado y contracciones en *A. mangium* son catalogados como nulos o leves, con excepción de las encorvaduras y arqueaduras las cuales tienden a ser severos. Defectos como alabeo, encorvadura, acanaladura y la contracción en acho de la tabla no fueron afectados por el tipo de secado aplicado, si no que fueron afectados por otros factores como el clima donde se desarrolla el árbol, el patrón de corte y los CHi y CHf. En tanto que los defectos de arqueadura rajaduras, grietas y contracciones en espesor si fueron afectados por el secado, no obstante el tipo de secado no ejerció influencia en el desarrollo de estos. Así mismo las contracciones que sufre la madera aserrada durante el secado no se ven influenciadas por el tipo de secado que se le aplica a la madera.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Vicerectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica, y a la empresa Ganadera Barsa S.A. por facilitar el material utilizado en este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar; D; Moya, R; Tenorio, C. 2009. Wood color variation in undried and kiln-dried plantation-grown lumber of *Vochysia guatemalensis*. *Maderas Ciencia y Tecnología* 11(3): 207-216.

Arisman, H; Hardiyanto, EB. (2006). Acacia mangium – a historical perspective on its cultivation. In: Potter, K.; Rimbawanto, A. and Beadle, C. (eds), Heart rot and root rot in tropical Acacia plantations. Proceeding of a workshop held in Yogyakarta, Indonesia, February 7-9, 2006, pp.11-15.

ASTM (American Society for Testing and Materials, US), 2003. ASTM D-4442-92, Standard test methods for direct moisture content measurements of wood and wood-Base materials (Reproved 2003).

Barry, K.M; Irianto, R.S.B; Santoso, E; Turjaman, M; Widyati, E; Sitepu, I; Mohammed, C.L, 2004. Incidence of heartrot in harvest-age *Acacia mangium* in Indonesia, using a rapid survey method. *For. Ecol. Manage.* 190, 273–280.

Barry, K.M; Irianto, R.S.B; Tjahjono, B; Tarigan, M; Agustini, L; Hardiyanto, E.B; Mohammed, C.L. 2006. Variation of heartrot, sapwood infection and polyphenol extractives with provenance of *Acacia mangium*. *Forest Pathology* 36 (2006) 183–197.

Basri, E; Wahyudi, T. 2007. The drying properties and schedules of five wood species from West Papua. *J.Iimu & Teknologi Kayu Tropics.* 5:57-62.

Basri, E; Yuniarti; Karnita. 2009. The combination of silviculture and drying techniques resulted in good quality of mangium lumbers. Resumen en XIII Congreso mundial. Buenos Aires Argentina. Disponible en <http://www.cfm2009.org/es/programapost/resumenes/index.asp?offset=2790>. (Acezado 25 de agosto de 2010).

Bolaños, R; Watson, V. 1993. 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.

Boone, RS; Kozlik, CJ; Bois, PJ; Wengert, EM. 1988. Dry kiln schedules for commercial woods-temperate and tropical. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-57. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 158p.

Burtin, P., Jay-Allemand, C., Charpentier, J. and Janin, G. 1998. Natural wood colouring process in *Juglans* sp. (*J. regia* and hybrid *J. nigra* 23 x *J. regia*) depends on native phenolic compounds accumulated in the transition zone between sapwood and heartwood. *Trees* 12: 258-264.

Cai, Y; Hayashi, K. 2007. New monitoring concept of moisture content distribution in wood during RF/vacuum drying. *Journal of Wood Science.* 53: 1-4.

Cui, W; Kamdem, P; Rypstra, T. 2004. Diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy (DRIFT) and color changes of artificial weathered wood. *Wood and Fiber Science* 36: 291-301.

Forest Products Laboratory. 1999. Wood handbook—Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, 450 p.

Gierlinger, N; Jacques D; Gradner, M; Wimmer, R; Schwanninger, M; Rozenberg, P; Pâques L.E. 2004. Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. *Trees* 18: 102-108.

Gu, H; Young, TM; Moschler, WW; Bond, BH. 2004. Potential sources of variation that influence the final moisture content of kiln-dried hardwood lumber. *Forest Products Journal* 54(11):65-70.

Hallock, HY; Malcolm, FB. 1972. Sawing to reduce warp in plantation red pine studs. Research paper FLP-164. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison.

Health Science Center. 2008. Image Tools. Texas University—San Antonio. Available at: <http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/download.html>. [Cited 15 Feb 2008].

Hon, C.H. 1984. Graded sawn timber recovery study of *Acacia mangium*. *Malaysian Forester*. 47 (2): 116-124.

Jeremic, D; Cooper, P; Srinivasan, U. 2004. Comparative analysis of balsam fir wetwood, heartwood, and sapwood properties. *Canadian Journal of Forests Research*. 34: 1241–1250.

Keey, R. 2005. Colour development on drying. *Maderas Ciencia y Tecnología*. 7: 3-16.

Larcher, W. 1995. *Physiological Plant Ecology*. 3rd ed. Springer, Berlin, Germany. 215-275.

Lee, S.S; Arentz, F. 1997. A possible link between rainfall and heartrot incidence in *Acacia mangium*. *J. Trop. For. Sci.* 9, 441–448.

Lim, S.C; Gan, K.S; Choo, K.T. 2003. The characteristics, properties and uses of plantation timbers rubberwood and *Acacia mangium*. Timber Technology Centre. Kepong, Kuala Lumpur.

Luostarinen, K; Möttönen, V. 2004. Effect of growing site, sampling date, wood location in trunk and drying method on concentration of soluble proanthocyanidins in *Betula pendula* wood with special reference to wood colour. *Scandinavian Journal of Forests Research* 19: 234- 240.

Nishino, Y; Yanin, G; Chanson, B; Détienne, P; Gril, J; Thibaut, B. 1998. Colorimetry of wood specimens from French Guiana. *Journal of Wood Science*. 44: 3-8.

- NIST (National Institute of Standards and Technology, US). 2005. Softwood lumber standard: Voluntary product standard PS 20-05. Washington, DC, US. Technology Administration, U.S. Department of Commerce. 38 p.
- Milota, MR. 1996. Method of measurement of bow and crook. *Forest Products Journal* 41(9): 65–68.
- Möttönen, V; Alvila, L; Pakkanen, T.T. 2002. CIEL*a*b* measurements to determine the role of felling season, log storage and kiln drying on coloration of silver birch wood. *Scandium Journal of Forest Research* 17: 179-191.
- Moya, R; Muñoz, F. 2008. Wet pockets in kiln-dried *Gmelina arborea* lumber. *Journal of Tropical Forest Science*. 22 (3): 317-328.
- Moya, R; Muñoz, F. 2010. Physical and mechanical properties of eight species growing in fast growth plantations in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science*. 22 (3): 317-328.
- Moya, R; Berrocal, A. 2010. Wood color variation in sapwood and heartwood of young trees of *Tectona grandis* and its relationship with plantation characteristics, site, and decay resistance. *Annals Forest Science*. 67 (2010) 109.
- Moya, R; Ureña, E; Salas, E; Muñoz, F. 2011a. Kiln drying defects presence and grouping of wood from ten tropical species growing in fast-growth plantation. *Wood material science and engineering* (Submit).
- Moya, R; Aguilar, D; Tenorio, C; Bond, B. 2011b. Variation of moisture content in kiln dried plantation grown lumber of *Vochysia guatemalensis*. *Wood fiber and science* (Submit).
- Muñoz; F; Moya, R. 2008. Moisture content variability in kiln-dried *Gmelina arborea* wood: effect of radial position and anatomical features. *Journal of Wood Science*. 54: 318-322.
- Ofori, J; Brentuo, B. 2005. Green moisture content, basic density, shrinkage and drying characteristics of the wood of *Cedrela odorata* grown in Ghana. *Journal Tropical of Forest Science* 17: 211–223.
- Ogata, Y; Nobuchi, T; Fujita, M. 2002. Asynchronous Wood formation on young *Acacia mangium* planted in Malaysia. *Journal of Wood Science*. 48: 89-94.
- Pérez, P; Ananias, R.A; Hernandez, G. 2007. Estudio experimental del secado de renovales de canelo *Drimys winteri*. *Maderas Ciencia y Tecnología*. 9(1): 59-70.
- Phelps, J.E; McGinnes, E; Garrett, H.E; Cox, G.S. 1983. Growth-quality evaluation of black walnut wood. Part II—color analyses of veneer produced on different sites. *Wood and Fiber Science* 15: 177–185.
- Piao, CH; Teng-Tong, TL; Teng, T. 2000. Research on the drying of *Acacia mangium* lumber. *China Wood Industry* 14(1): 16-18.

- Qumruzzaman, C; Iftekhar S; Mahbubul, A. 2005. Effects of age and height variation on physical properties of mangium (*Acacia mangium* Willd) wood. *Australian Forestry*. 68: 17-19.
- Sahri, M.H; Thrahim, F.H; Shukor, N.A. 1993. Anatomy of *Acacia mangium* grown in Malaysia. *IAWA Journal*. 14 (3): 245-251.
- Sattar, A; Sarkar, S; Taukkdar, Y. 1991. Kiln drying of Gamar (*Gmelina arborea*) using varying sticker thickness and dryings schedules. *Bangladesh Journal of Forest Science*. 20: 49-54.
- Serrano, J.R. and D. Cassens. 2001. Reducing warp and checking in plantation grown yellow poplar 4 by 4's by reversing part positions and gluing in the green condition. *Forest Products Journal* 51(11/12): 37-40.
- Shah, N; Kamaluddin, M; Manzoor, R. 2005. Growth and yield prediction models for hybrid acacia (*A. aculiformis* & *A. mangium*) grown in the plantations of Bangladesh. *Pakistan Journal of Biological Sciences*. 8: 1137-1141.
- Simpson, W. 1991. Properties of wood related to Drying. In: Simpson W (ed) *Dry Kiln Operator's Manual Handbook AH-188*. USDA. Forest Service. Forest Products Laboratory. WI. pp I1-I50.
- Simpson, W. 1999. Drying and control of moisture content and dimensional changes. In *Wood Handbook- Wood as an Engineering Material*. Gen. Tech. Reo. FPL-GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463p.
- Skkar, C., 1972. *Water in Wood*. 1 ed. Syracuse University Press, Syracuse. 218 p.
- Taylor, A; Gartner, B; Morrell, J. 2002. Heartwood formation and natural durability-a review. *Wood and Fiber Science*. 34 (4): 587-611.
- Torres, D; Del Valle, J. 2007. Growth and yield modelling of *Acacia mangium* in Colombia. *New Forests*. 34: 293-305.
- Ward, J.C. 1984. Influence of wetwood on pulsed-current resistances in lumber before and during kiln-drying. *Wood and Fiber Science*. 16: 598-617.
- Ward, J.C. 1986. The effect of wetwood on lumber drying times and rates: an exploratory evaluation with longitudinal gas permeability. *Wood and Fiber Science*. 18: 288-307.
- Ward, JC; Pang, WY. 1980. Wetwood in trees: a timber resource problem. United USDA, Pacific Northwest Forest and Range Experimental, General Tech. Rep. PNW-112, U.S. Forest Service, Madison. 87 p.
- Yamamoto, K; Sulaiman, O; Hashim, R. 1997. Wetwood of *Acacia mangium* in Malaysia. In *JIRCAS Newls*, No. 12, ed. Kunio Tsubota, JIRCAS, Tsukuba, Japan, 5-6.

Yamamoto, K; Sulaiman, O; Kitingan, C; Choon, L; Nhan, N. 2003. Moisture distribution in stems of *Acacia mangium*, *A. auriculiformis* and hybrid acacia trees. Japan Agricultural Research Quarterly 37 (3): 207-212.

Zobel, BJ. 1984. The changing quality of the world wood supply. Wood Science Technology. 18: 1-17.

Zobel BJ, Van Buijtenen B (1989) Wood Variation: its causes and control. Springer-Verlag, New York. 458 pp.

Zobel, BJ; Sprague, J.R. 1998. Juvenile Wood in forest trees. Springer Verlag, New York, USA, 299p.

Anexo 4: Artículo científico Tenorio, C; Moya, R. 2010. Influencia de la anatomía en el contenido de humedad, las contracciones y en los defectos en madera aserrada de *Vochysia guatemalensis* antes y después del secado. Maderas. Ciencia y Tecnología (A someter).

INFLUENCIA DE LA ANATOMÍA EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD, LAS CONTRACCIONES Y EN LOS DEFECTOS EN MADERA ASERRADA DE *VOCHYSIA GUATEMALENSIS* ANTES Y DESPUÉS DEL SECADO

INFLUENCE OF ANATOMY FEATURES ON MOISTURE CONTENT, SHRINKAGE AND DEFECTS IN *VOCHYSIA GUATEMALENSIS* WOOD BEFORE AND AFTER DRYING

Carolina Tenorio¹ Roger Moya¹

RESUMEN

Vochysia guatemalensis es una especie nativa con gran aceptación en la reforestación comercial en Costa Rica. Sin embargo, la madera aserrada presenta poca uniformidad del contenido de humedad (CH) y alta incidencia de defectos luego del secado. Se determinó la influencia del largo y diámetro de fibra, diámetro del lumen, espesor de la pared, diámetro, frecuencia y porcentaje de poros, ancho, altura y frecuencia de los radios y la cantidad de células en el radio sobre el CH, las contracciones y los defectos antes y después del secado. Los resultados mostraron un CH inicial promedio de 159% con una alta variabilidad, siendo el diámetro de los poros la variable anatómica de mayor influencia, pero con un aporte de 13% sobre la variabilidad de CH. El CH final promedio fue de 13,1%, con una variación de 10 a 24%, y fue afectado por la distancia de la médula y el CH inicial, pero ningún parámetro anatómico afectó este CH. Las torceduras, grietas, rajaduras, reventaduras y contracciones fueron poco influenciadas por algunas de las propiedades anatómicas, sin embargo, su influencia tiende a desaparecer ante el efecto de otras variables como la distancia de la médula y el CH final.

Palabras clave: torceduras, elementos anatómicos, madera tropical, madera juvenil.

¹ Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Autor de correspondencia: rmoya@itcr.ac.cr

ABSTRACT

Vochysia guatemalensis is a native species planted widely in commercial reforestation in Costa Rica. However, dried-lumber presents low uniformity of the moisture content and severe drying defects after drying. It was determinate the influence of length and fiber diameter, lumen diameter, cell wall thickness, diameter, frequency and percentage of porous, width, height and frequency of ray and cell number present in width in the ray on the moisture content (MC), shrinkage and drying defects before and after drying. The results showed an initial MC averaged 159%, with a high variability and vessels diameter was the only anatomical features affecting the initial MC. The final MC averaged 13.1%, ranging from 10 to 24% and it was affected by the distance from the pith and initial MC, but it was not affect by any anatomical feature. It was determined that warps, checks, splits, checks and shrinkages were influenced by some anatomical features, however, its influence tends to disappear under the effect of other variables such as distance from de pith and final MC.

Keywords: warps, anatomical features, juvenile wood, tropical wood.

INTRODUCCIÓN

El secado de la madera es una etapa importante en los procesos de manufactura ya que este contribuye a la estabilidad dimensional, la trabajabilidad, la compatibilidad con acabados y adhesivos, y brinda mejores propiedades térmicas, acústicas y de aislamiento eléctrico, además permite incrementar las propiedades mecánicas y la resistencia a la biodegradación (Gu *et al.* 2004). Los procesos de secado se deben llevar a cabo con un estricto control, esto con el fin de reducir la variación en el contenido de humedad final (CHF) y prevenir los defectos de secado (Simpson 1999, Gu *et al.* 2004). La falta de uniformidad en el CHF afecta no solo la calidad de los productos fabricados (Cai y Hayashi 2007) y su valor económico, sino que además influye en algunas de sus propiedades de trabajabilidad y uso final (Gu *et al.* 2004).

Entre los factores que afectan la variabilidad del CHF se destacan: las características propias de las especies (Mottonen 2006), la presencia de extractivos (Burtin *et al.* 1998, Key 2005), la edad del árbol (Qumruzzaman *et al.* 2004), el contenido de humedad

inicial de la madera (CHi) (Moya y Muñoz 2008, Ofori y Brentuo 2005), el programa de secado (Simpson 1999, Gu *et al.* 2004), la presencia de albura y duramen (Yamamoto *et al.* 2003) y el lugar de procedencia de la madera (Luostarinen y Mottonen 2004, Gu *et al.* 2004), entre otras condiciones.

A su vez, diversos estudios han demostrado que los defectos son producidos durante el proceso de aserrío (Archer 1986) y que estos se ven acentuados durante el proceso de secado (Simpson 1991). No obstante hay otros factores que influyen en el desarrollo de estos, entre los que se destacan: el método de secado (Klaiber y Seeling 2004), el programa de secado (Milota 1992), la distancia relativa de la médula (Ikami *et al.* 2009, Rubin y Joseph 2007), árboles con altos porcentajes de madera juvenil (Zobel y Sprague 1998) y la madera de reacción y las tensiones de crecimiento (Archer 1986). Sin embargo, estudios del efecto de las características anatómicas de la madera sobre el desarrollo de los defectos de secado son escasos ya que en su mayoría se da como un hecho que las propiedades anatómicas producen un efecto de colinearidad en algunas propiedades tales como la contracciones, madera juvenil, peso específico, grano en espiral, entre otros.

Por otro lado, *Vochysia guatemalensis* es una especie nativa con gran aceptación en los programas de reforestación comercial en Costa Rica (Calvo-Alvarado *et al.* 2007). Esto debido a su rápido crecimiento y a su buena adaptación a sitios con suelos degradados (Calvo-Alvarado *et al.* 2007). Sin embargo, la utilización de madera de plantaciones, tanto de raleos como la de cosecha final, en la fase de industrialización, específicamente en el proceso de secado, muestra graves problemas en cuanto a calidad. Moya *et al.* (2011b) señalan que la especie posee poca uniformidad del CHi y CHF, además algunos estudios caracterizan la madera aserrada proveniente de bosque natural como susceptible a producir colapsos y rajaduras cuando es secada al aire y con incidencia de defectos como torceduras (alabeo y acanalado), rajaduras y grietas si proviene de plantaciones forestales (Moya *et al.* 2011a, Solis y Moya 2004).

Moya *et al.* (2011b), al estudiar el CHi de la madera de *V. guatemalensis* señalan un promedio de 159%, presentándose una alta variabilidad con valores entre 98-281%. Así mismo, dichos autores señalan que el clima, la ubicación radial y en altura de la tabla dentro del árbol y la presencia de madera de duramen son los principales factores que

influyen en el CHI. Del mismo modo, al evaluar la presencia de defectos en la madera aserrada de 8 años Moya *et al.* (2011a) encontraron que antes del secado se presentan encorvaduras, arqueaduras, grietas y rajaduras, y que después del secado la incidencia de estos defectos aumentan y se presentan alabeos y acanaladuras. También señalan que la madera de dicha especie, junto con la de *Acacia mangium*, es la que presenta una mayor incidencia de defectos en comparación con otras seis especies de rápido crecimiento plantadas en Costa Rica.

Aunque la madera de *V. guatemalensis* proveniente de plantaciones forestales, ha sido ampliamente estudiada mediante el desarrollo de investigaciones llevadas a cabo para determinar su variación anatómica (Butterfield *et al.* 1993, Gonzalez y Fisher 1998) y CHI y CHF, y de los defectos producidos por el secado, se tiene poco conocimiento de las causas que producen esta variabilidad o el desarrollo de los defectos en la madera relacionado a características anatómicas. En vista de ello, es que la presente investigación tiene como objetivo determinar la influencia de diversas propiedades anatómicas (largo y diámetro de fibra, diámetro del lumen, espesor de la pared, diámetro, frecuencia y porcentaje de poros, ancho, altura y frecuencia de los radios y la cantidad de células presentes en el ancho), sobre el CHI y el CHF, las contracciones y en los defectos de la madera aserrada antes y después del secado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y características de las plantaciones

La madera utilizada en el estudio fue extraída de dos plantaciones de rápido crecimiento de *V. guatemalensis* ubicadas bajo dos condiciones climáticas distintas en Costa Rica. El detalle de las condiciones climáticas y del sitio donde se ubicaban las plantaciones, así como sus condiciones dasométricas, pueden ser consultadas en Aguilar *et al.* (2009) y en Moya *et al.* (2011b).

Muestreo de árboles y aserrío

En cada plantación muestreada fue establecida una parcela de medición y diez árboles con un diámetro cercano al promedio de la plantación fueron seleccionados próximos a estas. Luego, dos trozas de 2,5 m fueron cortadas y transportadas hacia el patio del aserradero del Instituto Tecnológico de Costa Rica para su procesamiento.

Estas trozas fueron aserradas en tablas a 2,5 cm de espesor a todo lo ancho de la troza y fueron cortadas perpendicularmente al sentido Norte-Sur, posteriormente con la ayuda de una desorrilladora fue eliminado el canto que aun mantenía la forma de la troza (Figura 1a). En el momento de obtener cada tabla de la troza se midió la distancia de la médula, para establecer la ubicación de la tabla en relación al radio de la troza (distancia relativa). Un total de 224 tablas se obtuvieron del total de las trozas, sin embargo por una serie de inconvenientes que ocurrieron durante el proceso de secado los análisis estadísticos se realizaron con 167 tablas.

Determinación de contenido de humedad inicial

Cada tabla de 2,5 m de longitud fue cortada transversalmente a 27 cm del extremo inferior del árbol, posteriormente a esa altura fue extraída una sección transversal de 2,5 cm de espesor para la determinación del contenido de humedad inicial (CHi). La longitud de las tablas a evaluar antes, durante y después del secado fue de 2,15 m. En la pieza de 27 cm cortada inicialmente se obtuvo un bloque de 2 cm x 2 cm x 2 cm para extraer las muestras de medición de los elementos anatómicos (Figura 1b). Para la determinación del CH se siguió el procedimiento descrito en la norma ASTM D-1442-92 (ASTM 2003), que consiste en pesar la muestra en condición verde, secar por 24 horas a 103 grados centígrados y luego volver a pesar, para expresar la diferencia luego del secado en relación a la masa que contenía la muestra antes del mismo.

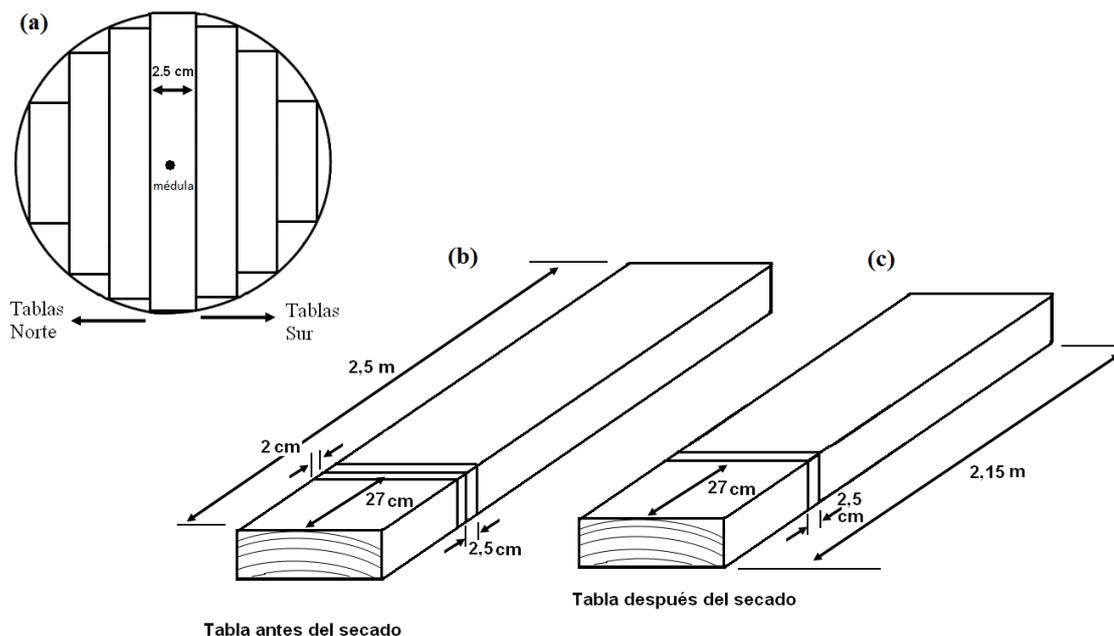


Figura 1. Patrón de aserrío utilizado en cada troza y obtención de muestras para determinación de contenido de humedad en la tabla.

Secado y determinación del contenido de humedad final

Las tablas fueron apiladas en una secadora piloto con capacidad para 2 m³ marca Nardi, en esta se apila la madera en un paquete de aproximadamente 1,2 m x 1,0 m x 2,2 m de largo, con separadores de 2 cm de espesor. Se realizaron dos corridas de secado para poder secar la totalidad de tablas. El programa de secado utilizado es descrito por Aguilar *et al.* (2009). Para la determinación del CHF nuevamente se cortó a 27 cm del extremo superior en las tablas secas una sección transversal de 2,15 cm (Figura 1c) y nuevamente se siguió el procedimiento detallado para la determinación del CHI.

Propiedades anatómicas

Las características anatómicas medidas fueron las dimensiones de las fibras (longitud, diámetro del lumen y la fibra y el espesor de la pared), diámetro y frecuencia de los vasos, porcentaje de vasos múltiples (vasos compuestos de 2-4 células), ancho, altura y frecuencia de los radios, así como cantidad de células que componen los radios en el ancho. Las dimensiones de las fibras fueron realizadas sobre material macerado y el resto de las dimensiones de los elementos anatómicos fueron medidos sobre las láminas permanentes del corte transversal y tangencial. La preparación del material macerado y

las láminas permanentes fueron realizadas aplicando el procedimiento propuesto por Franklin Ruzin, ambos procedimientos detallados ampliamente por Moya y Tomazello (2008). Las dimensiones de las fibras fueron medidas en 50 fibras sobre fotografías digitales a 10X para el largo y 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. En la frecuencia de los vasos fueron tomadas 8 fotografías digitales a un aumento de 4X de la sección transversal recorriendo toda el área del corte microscópico, el diámetro del vaso fue determinado 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 fueron tomados 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.

Evaluación de la presencia de defectos en la madera

En cada una de las tablas obtenidas en el proceso de aserrado (167) fueron medidas las torceduras de la tabla (alabeo, encorvadura, acanaladura y arqueadura), grietas, reventaduras y rajaduras antes y después del secado. Métodos de medición sugeridos por Halcom y Malcom (1972) y Milota (1996), fueron utilizados para la medición de todos estos defectos. Los defectos fueron medidos en su punto máximo en cada una de las tablas, sobre una mesa recta y plana. El siguiente procedimiento fue usado para medir las torceduras: (1) cada una de las tablas fue posicionada sobre la mesa para examinar la magnitud del defecto, (2) si la magnitud del defecto que presenta la tabla fue muy pequeño o poco medible, se le asignó a la tabla un valor de cero o sin defecto, (3) en las tablas que si presentaban defectos medibles, estas fueron posicionadas de tal forma que el defecto fuera medido con la ayuda de cintas métricas o calibradores, en el punto máximo de la abertura con respecto al plano de la mesa.

Estos valores fueron reportados por: (1) la magnitud del defecto (milímetros para la mayoría todos los casos) antes y después del secado, (2) la cantidad de piezas en relación a la cantidad de piezas totales (porcentaje de incidencia) y (3) por su diferencia, es decir, la diferencia en magnitud que tenía el defecto antes de secado y luego del

secado. Además se determinó la diferencia de magnitud de los defectos antes del secado con los obtenidos después del secado. En lo referente a la magnitud de los defectos luego del secado fue catalogado en: (i) aumento del defecto, (ii) disminución del defecto y (iii) el defecto no aumento o disminuyó en magnitud, todas ellas en relación a los valores que presentaban las tablas antes del secado.

Contracciones de la madera

Las contracciones se determinaron en condición verde (antes del secado) y en condición seca (después del secado), en dos sentidos: en espesor y en ancho. Las contracciones fueron calculadas como la diferencia de la dimensión inicial y la final en relación al ancho o espesor, según sea el caso, y se expresaron porcentualmente.

Análisis estadísticos

Los programas utilizados para realizar las pruebas estadísticas fueron Statistical SAS y STATISTICA. Una matriz de correlación de Pearson fue usada para determinar cuáles características anatómicas se encontraban más correlacionadas con los defectos, el CHi y CHf. En el análisis de correlación de los defectos antes y después del secado, de la diferencia de magnitud de los defectos, del CHi y CHf y de la distancia de la médula fueron considerados el diámetro de fibra, diámetro de lumen, largo de fibra, espesor de pared, diámetro de poros, frecuencia de poros, porcentaje de poros múltiples, frecuencia de radios, ancho de radios, altura de radios y cantidad de células en ancho. Posteriormente se realizó una regresión múltiple (forward stepwise analysis) para definir el grado de influencia de las variables correlacionadas.

RESULTADOS

Contenido de humedad inicial (CHi)

El promedio del CHi fue de 159%, presentándose una alta variabilidad con valores entre 98 y 281% y un coeficiente de variación de 40%. Otros estudios realizados sobre esta especie también confirman esta variabilidad y el alto valor de CHi de madera proveniente de plantaciones forestales. Moya *et al.* (2011a) reportan un promedio de CHi de 177% y una variabilidad de 160 a 192% para madera de árboles de 10 años de edad, en tanto que Moya y Muñoz (2010) para plantaciones de 8 años reportan un promedio de 146% y una variación de 140 a 160%. Al comparar estos valores con otras

especies de plantaciones de climas tropicales con pesos específicos básicos (PEB) similar a *V. guatemalensis* (PEB=0,32), se reportan también altos CHI y altas variabilidades. Por ejemplo, en el caso de la *Gmelina arborea* (PEB=0,40), se presenta un CHI de 170%, registrando una variación entre 144 y 181% (Muñoz y Moya 2008). En tanto que la especie *Hyeronima alchorneoides* (PEB= 0,48) se reporta un CHI promedio de 111% y una variación entre 95 y 120% (Moya *et al.* 2009).

La variación del CHI es presentada en la figura 2a, la cual muestra la distribución de frecuencia de los valores de CHI de las tablas secas. En dicha figura se puede observar como la mayoría de las tablas presentan un CHI que se concentra entre 106 a 182%. No obstante, a pesar de esta concentración de valores de CHI una cantidad importante de tablas poseen CHI sobre 197%, los que se consideran valores bastante altos para una madera. En algunas especies se ha encontrado que altos valores de contenidos de humedad son justificados por la presencia de madera juvenil, que se caracteriza por tener bajas densidades cerca a la médula (Zobel y Sprague 1998), dando como resultado la acumulación de agua en los espacios vacíos de la estructura anatómica (Bowyer *et al.* 2007). En este caso los árboles utilizados en este estudio provenían de plantaciones de 8 años de edad, los cuales con seguridad presentan un alto porcentaje de madera juvenil y por ende un alto CHI.

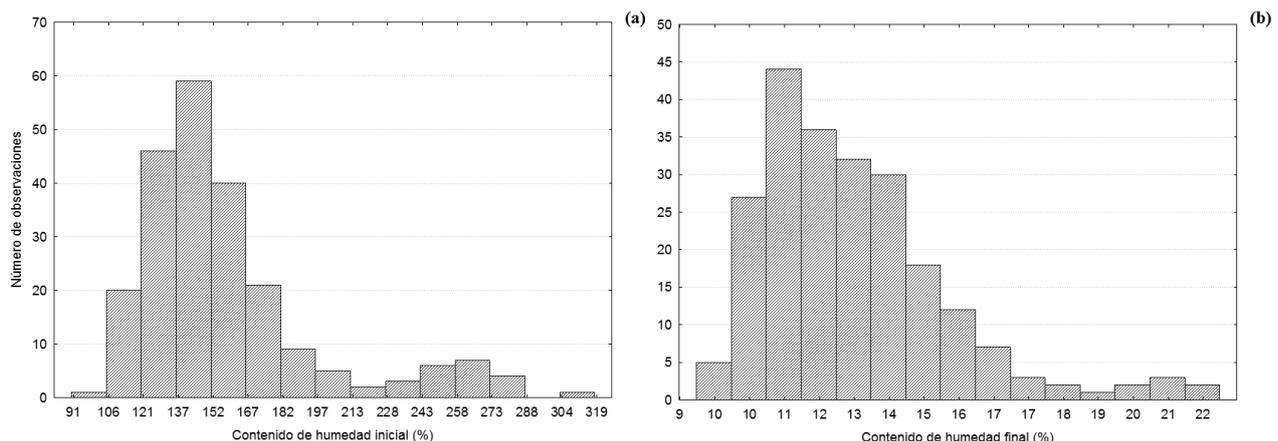


Figura 2. Distribución del CHI y CHF en la totalidad de tablas evaluadas de *V. guatemalensis*.

El CHI fue afectado negativamente ($\alpha < 0,05$) por la distancia relativa a la médula, el espesor de pared, el diámetro de poros y la altura de los radios, y en tanto que

positivamente por la frecuencia de poros (Tabla 2). No obstante, el análisis de regresión múltiple (Tabla 3), demostró que el diámetro de los poros fue la única variable anatómica que posee mayor influencia en el CHI con una aporte del 13% sobre su variabilidad. En tanto que las otras variables (espesor de pared, la altura de los radios y frecuencia de poros), aunque presentan una correlación con el CHI, estos efectos desaparecen por la influencia que tienen el diámetro de los poros (Tabla 3).

La disminución del CHI con la distancia de la médula ha sido encontrada en otras especies de plantaciones de los climas tropicales de América Central, como por ejemplo en *G. arborea*, (Muñoz y Moya 2008) y en *Cedrela odorata* (Ofori y Brentuo 2005). No obstante, en ninguno de los casos se estudio el efecto de la anatomía de la madera en el valor de CHI.

En los árboles de *V. guatemalensis* el largo de las fibras y el diámetro de los poros aumentan conforme se acercan a la corteza, y la frecuencia de los poros disminuye con la distancia de la médula (Butterfield *et al.* 1993, González y Fisher 1998). De esta forma se explica que en este caso el CHI presente una relación negativa con la distancia de la médula, ya que el espesor de la pared de las fibras, la altura de los radios y el diámetro de los poros aumentan conforme se acercan a la corteza, y la frecuencia de los radios disminuye en la misma dirección, provocando que la cantidad de espacios donde se almacena el agua disminuya (menor frecuencia de poros y una mayor pared celular). Así por lo tanto, las relaciones encontradas entre CHI con la distancia relativa a la médula, el espesor de pared y la altura de los radios son variables colineales del diámetro de los poros.

Contenido de humedad final (CHf)

El CHf promedio de todas las tablas secas fue de 13,1%, con una variación de 10 a 24%. De modo que *V. guatemalensis* es una especie que tiende a presentar CHf poco uniforme. Esta falta de uniformidad afectará notablemente la utilización de la madera cuando se usa en la fabricación de muebles, puertas u otros productos (Simpson 1999). Moya *et al.* (2011a) estudiando el secado de la misma especie con árboles de 10 años encontró una variación del CHf de 9,5 a 20%. Así mismo, la variación del CHf ha sido objeto de estudio en algunas otras especies tropicales creciendo en plantaciones de rápido crecimiento. Por ejemplo, *G. arborea* reporta una variabilidad de entre 10 y 36% en madera de 2,5 cm de espesor (Muñoz y Moya 2008) y en *Acacia mangium* se reportan valores promedio de 19% con una variación de 9 a 52% (Tenorio *et al.* 2011).

Aunque se presente en general una alta variación del CHF, un alto porcentaje de las tablas evaluadas se concentran principalmente entre un 10% y un 16% (Figura 2b) y únicamente se presentó un 10% de la totalidad de las tablas con CHF superiores a 17%. La variación del CHF de la madera está presente en todo proceso de secado, no obstante esta debe ser minimizada para mejorar la estabilidad de la madera y la calidad del producto final (Gu *et al.* 2004). Se considera un secado satisfactorio, cuando el promedio de CHF presenta una variación de $\pm 1\%$ (Simpson 1999), en este caso de 11-13%. De este modo se confirma que *V. guatemalensis* es una especie con dificultades para lograr un CHF satisfactorio.

Al evaluar los factores que afectan el CHF se encontró que este presenta una correlación significativamente negativa con la distancia relativa a la médula y con el diámetro de los poros, y positiva con el CHI y con la frecuencia de los poros (Tabla 2). Pero el análisis de regresión múltiple mostró que solamente la distancia relativa a la médula es la variable que más influye en el CHF y seguida del CHI (Tabla 3). Un aspecto importante de hacer notar, es que ninguna de las variables anatómicas influye significativamente en el CHF cuando se realiza el análisis de “regresión stepwise”, indicando con ello que los parámetros anatómicos pasan a un plano secundario y se vuelve más importante la distancia de la médula, probablemente por la relación entre la disminución del CHI con la distancia de la médula.

Muñoz y Moya (2008) estudiando la variabilidad del CHF en *G. arborea* con la distancia de la médula y las características anatómicas, señalan que el CHF se encuentra negativamente correlacionado con la distancia de la médula, el largo de la fibra y el ancho de los radios, mientras que el diámetro de las fibras se encontró positivamente correlacionado. Relacionando dichos resultados con los obtenidos en este estudio se observa como la distancia de la médula es el único factor común de la variación del CHF entre las dos especies.

Tabla 2. Coeficientes de correlación y significancia de las variables evaluadas en el contenido de humedad y los defectos de la madera de *V. guatemalensis*.

Factor		CHi	CHf	Distancia médula	Largo fibra	Diámetro fibra	Diámetro lumen	Espesor de pared	Diámetro poros	Frecuencia de poros	% Poros múltiples	Frecuencia de radios	Ancho de radios	Altura de radios	Cantidad de células en ancho
Distancia médula		-0,209**	-0,480**	-	-	-	-	-	0,479**	-	-0,158*	-	-	0,369**	-
Contenido de humedad	Inicial	-	-	-0,209**	-	-	-	-0,202**	-0,379**	0,168*	-	-	-	-0,197*	-
	Final	0,219**	-	-0,480**	-	-	-	-	-0,261**	0,161*	-	-	-	-	-
Alabeo	Antes	-	0,185*	-	-	-	-	-	-	0,169*	-	-	-	-	-
	Después	-	-	0,218**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,237**	-
	Diferencia	-	-	-0,232**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,262**	0,153*
Encorvadura	Antes	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Después	-	-	-	-	-	-	-	-	0,162*	-	-	-	-	-
	Diferencia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Arqueadura	Antes	-	-0,481**	0,249**	-	-	-	-	0,168*	-	-	-	-	-	-
	Después	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,167*	-	-	-	-
	Diferencia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,172*	-	-	-	-
Acanaladura	Antes	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,181*	-	-	-
	Después	-	-0,196*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Diferencia	-	0,184*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Grietas	Antes	-	-	-0,2062**	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1749*	-	-
	Después	-	-	-0,170*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Diferencia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,184*	-	-
Rajaduras	Antes	0,213**	-	-0,320**	-	-	-	-	-0,213**	-	-	-	-	-0,203**	-
	Después	0,286**	0,283**	-0,377**	-	-	-	-	-0,325**	0,175*	-	-	-	-0,176*	-
	Diferencia	-	-0,159*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Reventaduras	Antes	0,226**	0,323**	-0,334**	-	-	-	-0,160*	-	-	-	-	-	-	-
	Después	-	0,285**	-0,272**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Diferencia	0,269**	-	-0,176*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Contracción	Ancho	-	-	-	-	-	-	-	0,192*	-0,156*	-	-	-	-	-
	Espeor	-	-	-0,311**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Nota: CHi = contenido de humedad inicial, CHf = contenido de humedad final, * estadísticamente significativo a $\alpha=0,05$, ** estadísticamente significativo a $\alpha=0,01$.

Tabla 3. Coeficientes de regresión múltiple y significancia de las variables evaluadas en el contenido de humedad y los defectos de la madera de *V. guatemalensis*.

Factor		Parámetros de regresión			
		1	2	3	4
Contenido de humedad	CHi r = 0,405	Diámetro de poros** 0,134	Espesor de pared 0,009	-	-
	CHf r = 0,494	Distancia médula** 0,229	CHi 0,014	-	-
Alabeo	Verde r = 0,216	CHf ** 0,028	Frecuencia de poros 0,019	-	-
	Seco r = 0,243	Distancia médula** 0,048	Altura de radios 0,011	-	-
	Diferencia r = 0,299	Distancia médula** 0,058	Cantidad células ancho 0,018	Altura de radios 0,013	-
Encorvadura	Verde	-	-	-	-
	Seco r = 0,106	Frecuencia de poros 0,011	-	-	-
	Diferencia	-	-	-	-
Arqueadura	Verde r = 0,472	CHf ** 0,223	-	-	-
	Seco r = 0,156	% Poros múltiples** 0,024	-	-	-
	Diferencia r = 0,299	% Poros múltiples** 0,026	-	-	-
Acanaladura	Verde r = 0,140	Frecuencia de radios** 0,019	-	-	-
	Seco r = 0,206	CHf ** 0,042	-	-	-
	Diferencia r = 0,198	CHf ** 0,039	-	-	-
Grietas	Verde r = 0,261	Distancia médula** 0,040	Ancho de radios** 0,028	-	-
	Seco r = 0,185	Distancia médula** 0,034	-	-	-
	Diferencia r = 0,185	Ancho de radios** 0,034	-	-	-
Rajaduras	Verde r = 0,362	Distancia médula** 0,108	CHi ** 0,022	-	-
	Seco r = 0,446	Distancia médula** 0,146	CHi ** 0,042	CHf 0,010	-
	Diferencia r = 0,160	CHf ** 0,026	-	-	-
Reventaduras	Verde r = 0,298	CHf ** 0,067	Distancia médula** 0,021	-	-
	Seco r = 0,258	CHf ** 0,054	Distancia médula 0,012	-	-
	Diferencia r = 0,240	CHi ** 0,038	Distancia médula** 0,020	-	-
Contracciones	Ancho r = 0,296	Diámetro de poros** 0,038	Frecuencia de poros 0,009	-	-
	Espesor r = 0,369	Distancia médula** 0,136	-	-	-

Nota: CHi = contenido de humedad inicial, CHf = contenido de humedad final, ** estadísticamente significativo a $\alpha=0,01$, los números debajo de los parámetros de regresión indican la contribución de cada parámetro al coeficiente de determinación (r^2).

Defectos en la madera antes y después del secado

El alabeo, encorvadura, arqueadura, acanaladura, grietas, rajaduras y reventaduras son los defectos presentes en la madera aserrada de *V. guatemalensis* antes del secado; siendo los de más alta incidencia la encorvadura y la reventadura, con valores superiores a 88% y 45% del total de tablas respectivamente (Figura 4a). La acanaladura no está presente en la madera en condición verde, pero sí se presenta una alta incidencia en las tablas después del secado (Figura 4a). Luego del proceso de secado, se aumentó la incidencia de alabeo, encorvadura, acanaladura, grietas y rajaduras en las tablas (Figura 4a). En tanto, las arqueaduras disminuyeron, y la incidencia de reventaduras se mantuvo luego del proceso de secado (Figura 4a).

Estudios realizados para la misma especie para madera de 10 años (Moya *et al.* 2011a) se encontró que antes y después del secado los defectos con mayor incidencia fueron la encorvadura y la arqueadura, y que no se presentaron problemas de acanaladura antes del secado, pero luego del secado esta se presentó en la totalidad de las tablas. No obstante, el problema de defectos de secado no es exclusivo de la madera de *V. guatemalensis*, esto porque otras especies tropicales plantadas en condiciones de rápido crecimiento también se caracterizan por la alta incidencia y magnitud de defectos antes y después del secado. Estudios llevados a cabo para *G. arborea* (Moya y Muñoz 2008), *A. mangium* (Tenorio *et al.* 2011) y otras ocho especies de rápido crecimiento en clima tropical (Moya *et al.* 2011a) mostraron a su vez una alta incidencia de defectos de secado.

Se observa un aumento en la incidencia de los defectos luego del secado, la evaluación de las tablas en estas 3 categorías (aumento, disminuyó o sin cambio) mostró que: las reventaduras se mantuvieron sin cambios después del secado, las grietas y rajaduras entre el 54-64% de las tablas se mantuvieron sin cambios (Figura 4b), sin embargo para la arqueadura y acanaladura entre el 58-96% de las tablas ocurrió un aumento de dichos defectos (Figura 4b). En tanto que en la encorvadura y el alabeo disminuyó la cantidad de tablas con este defecto luego del secado (Figura 4b). Estos resultados indican que el secado afecta de forma diferente a los diferentes defectos presentes en la madera, en algunos casos tiende a disminuirlos como con el alabeo, pero en otros casos estos aumentan como en las acanaladuras. Diversos estudios señalan los efectos producidos por el secado en los defectos, por ejemplo, Ikami *et al.* (2009) estudiando la influencia de la distancia de la

médula en las torceduras en la especie *Cryptomeria japonica*, señalan que mientras que el secado reduce las arqueaduras en la madera, las encorvaduras se mantienen sin cambios. En tanto que Moya *et al.* (2011a) en un estudio llevado a cabo con 10 especies de plantación (*A. mangium*, *Alnus acuminata*, *Bombacopsis quinata*, *Cupressus lusitanica*, *G. arborea*, *Swietenia macrophylla*, *Tectona grandis*, *Terminalia amazonia*, *Terminalia oblonga* and la misma *V. guatemalensis*) encontraron que en la mayoría de las especies el acanalado y alabeo aumentó luego del secado, en general se presentó una disminución de la arqueadura, el defecto de encorvadura se mantuvo en casi todas las especies y el alabeo en general se aumentó.

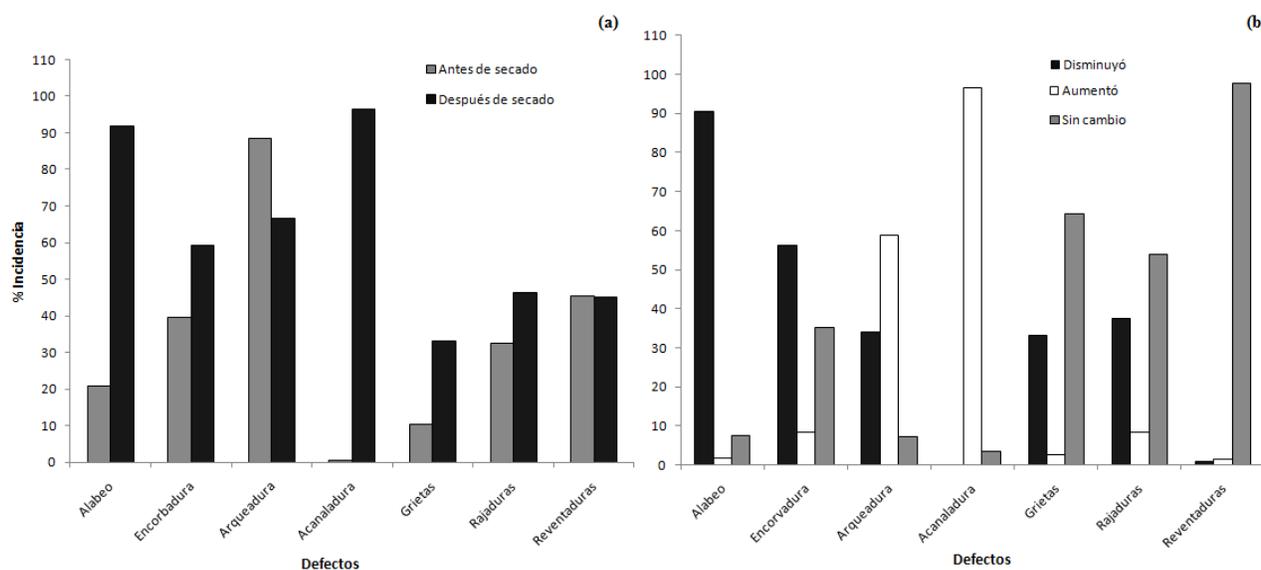


Figura 4. Porcentaje de incidencia de los defectos de secado antes y después del secado (a) y magnitud de la incidencia de los defectos (b), en tablas de madera de *V. guatemalensis*.

Al evaluar los factores que afectan los defectos se encontró que: el CHI presenta una correlación significativa únicamente con las rajaduras y reventaduras, sin presentar ninguna influencia en los diferentes tipos de torceduras de las tablas. Por el contrario el CHF influencia positivamente el alabeo antes y las reventaduras antes y después, las rajaduras después y en la diferencia de acanaladura. La arqueadura antes, la acanaladura después y la diferencia de rajaduras con el secado se ven influenciados negativamente por el CHF. La distancia relativa a la médula se encuentra correlacionada significativamente con

prácticamente todos los defectos de las tablas, con excepción de la encorvadura y la acanaladura (Tabla 2).

Con respecto a las propiedades anatómicas se observa que el largo y diámetro de la fibra, y el diámetro de lumen, no fueron correlacionados con ningún defecto en las tablas antes o después del secado (Tabla 2). El diámetro y la frecuencia de los poros, así como la altura de los radios son las propiedades anatómicas que más influyen en los defectos de la madera. La arqueadura antes, las rajaduras antes y después, se ven influenciadas positiva y negativamente, respectivamente por el diámetro de los poros (Tabla 2). La frecuencia de los poros influye positivamente el alabeo antes del secado, la encorvadura y las rajaduras después del secado. El alabeo después y la diferencia en magnitud, se encuentran correlacionados en forma positiva y negativa respectivamente con la altura de los radios; además de las rajaduras antes y después del secado en forma negativa (Tabla 2).

Es importante destacar que en la mayoría de los defectos influenciados por alguna característica anatómica esta solo se presentó en una condición (antes, después o diferencia). Y solamente en el caso de las rajaduras, la frecuencia de los poros y la altura de los radios influenciaron antes y después de secado. En el caso de la arqueadura el porcentaje de poros múltiples influenciaron después del secado y en la diferencia, presentándose del mismo modo en el alabeo con la altura de los radios (Tabla 2).

El análisis de regresión múltiple mostró que el CHF y la distancia relativa a la médula son respectivamente las variables que más influyen en los defectos de la madera (Tabla 3), indicando con ello que estos son los parámetros que se deben controlar durante el proceso de secado, de tal forma que la variación anatómica que se produce en las tablas pasa a un segundo plano en cuanto a la magnitud de los defectos de secado (Tabla 3). Sin embargo, la variación de algunas propiedades anatómicas como la frecuencia de radios, ancho de radios y porcentaje de poros múltiples contribuyen al desarrollo de los defectos de secado, específicamente en la magnitud de las arqueaduras después del secado y su diferencia, en el acanalado en condición verde, y en las grietas en condición verde y su diferencia (Tabla 3). No obstante, en dichas propiedades su porcentaje de explicación de la variabilidad de los defectos oscila entre 1,9 y 3,4% solamente. En el caso de rajaduras y reventaduras, ninguna propiedad anatómica influye significativamente en el desarrollo de los defectos (Tabla 3).

Así mismo en el caso de la magnitud de las encorvaduras estas fueron afectadas únicamente en condición seca por la frecuencia de los poros.

La industrialización de la madera de árboles de cortas edades de la especie *V. guatemalensis*, es propensa a producir una alta incidencia de defectos como alabeo, arqueadura y encorvadura, no obstante la variación anatómica que se produce desde la médula a la corteza tiene poca influencia en el desarrollo de los defectos luego del proceso de secado. Dichos resultados sugieren que otros defectos, aparte el CHF, son los que están influenciando en mayor proporción estos defectos. En la literatura se señala que la alta proporción de madera juvenil, los altos niveles de tensiones de crecimiento, altas contracciones de la madera (tangenciales y radiales) y una mayor inclinación de las microfibrillas en la pared celular S2 son los principales factores que limitan el desarrollo de los defectos de la madera durante el secado (Zobel 1984, Simpson 1991, Zobel y Sprague 1998). Por lo tanto es de esperar que en la madera de *V. guatemalensis* de árboles jóvenes, como los utilizados en el presente estudio, estos factores estén influyendo, de forma tal que las propiedades anatómicas de la madera pasan a un segundo plano en el desarrollo de defectos.

Contracciones de la madera

Las contracciones de la madera aserrada de *V. guatemalensis* fueron en promedio de 7,87% (0-15%) para el espesor y de 5,80% (0-27%) para el ancho. Las contracciones en ancho fueron negativamente relacionadas con la frecuencia de poros, en tanto que el diámetro de los poros tiene un efecto positivo en dicha contracción del ancho (Tabla 2). Al realizar el análisis de regresión múltiple se observó que el diámetro de los poros es la variable que más afecta la contracción en ancho (Tabla 3). De modo que conforme aumenta el diámetro de los poros la madera se contrae más en ancho. La contracción en espesor de las tablas no fue afectada significativamente por ninguna propiedad anatómica de la madera, solamente fue relacionada ($\alpha < 0,05$), y en forma negativa, con la distancia de la médula (Tabla 2 y 3).

Es interesante hacer notar que la contracción de la madera en muchos casos está relacionada con el espesor de la pared celular y con la frecuencia y el tamaño de los poros (Simpson 1991). A su vez es común encontrar una variación de estos elementos con la distancia de la médula (Butterfield *et al.* 1993, González y Fisher 1998), sin embargo en la

madera aserrada de la *V. guatemalensis* no está ocurriendo ello, de hecho se encontró que solamente el diámetro de los poros, el porcentaje de poros múltiples y altura de los radios están relacionados estadísticamente con la distancia de la médula. Esto significa que existen otros factores que están influyendo en el desarrollo de las contracciones de la madera al secar y que en este caso por tratarse de madera de corta edad (8 años), probablemente la inclinación de las fibras o microfibrillas en la pared celular, debido a su relación directa con las contracciones de la madera (Bowyer *et al.* 2007) sean el elemento que más influye, sin embargo, esto no se puede comprobar ya que no fue determinado.

CONCLUSIONES

El CHI de la madera de *V. guatemalensis* fue de 159%, presentando una alta variabilidad de 98 y 281%. Dicho valor es considerado de alta humedad y variabilidad. El valor de CHI fue afectado negativamente por el espesor de pared, el diámetro de poros y la altura de los radios, así como la distancia relativa a la médula, y en tanto que positivamente por la frecuencia de poros. No obstante, el análisis de regresión múltiple, demostró que el diámetro de los poros fue la única variable anatómica que posee mayor influencia en el CHI.

El CHF promedio fue de 13,1%, con una variación de 10 a 24%. De modo que *V. guatemalensis* es una especie que tiende a presentar CHF poco uniforme. El CHF fue afectado por el diámetro y a la frecuencia de los poros, pero estas propiedades anatómicas pasan a un segundo plano ya que la distancia relativa a la médula y el CHI tienen una mayor influencia en la variabilidad de la humedad luego del secado.

Las torceduras, grietas, rajaduras y reventaduras en tablas de madera secada al horno se ven influenciadas por pocas propiedades anatómicas. Solamente presentaron efectos la frecuencia de los poros, la altura y ancho de los radios y el porcentaje de poros múltiples. No obstante a pesar de que estas propiedades anatómicas tienen incidencia los defectos, estos tienden a desaparecer o pasar a un segundo plano ante la distancia de la médula y el CHF.

Las contracciones de las tablas en el ancho fueron afectadas negativamente por la frecuencia de poros, mientras que el diámetro de los poros tiene un efecto positivo en dicha contracción. La distancia de la médula fue la única variable que afecto la contracción en

espesor de las tablas. El aporte de dichas variables a la variabilidad de los datos es, sin embargo inferior al 15%. Esto significa que existen otros factores que están influyendo en el desarrollo de las contracciones de la madera al secar entre los que destaca madera juvenil y la orientación de las microfibrillas en la pared celular S2.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, D.; Moya, R.; Tenorio, C.. 2009. Wood color variation in undried and kiln-dried plantation-grown lumber of *Vochysia guatemalensis*. *Maderas Ciencia y Tecnología* 11(3): 207-216.

Archer, R.R. 1986. Growth Stresses and Strains in Trees. Springer-Verlag, New York. pp. 150-151.

ASTM (American Society for Testing and Materials, US). 2003. ASTM D-4442-92, Standard test methods for direct moisture content measurements of wood and wood-Base materials (Reproved 2003).

Bowyer, J.L.; Shmulsky, R.; Haygreen, J.G. 2007. Forest products and wood science: An introduction. 5 edition. Wiley-Blackwell. 558 p.

Burtin, P.; Jay-Allemand, C.; Charpentier, J.; Janin, G.. 1998. Natural wood colouring process in *Juglans* sp. (*J. regia* and hybrid *J. nigra* 23 x *J. regia*) depends on native phenolic compounds accumulated in the transition zone between sapwood and heartwood. *Trees* 12: 258-264.

Butterfield, R.P.; Crook, R.P.; Adans, R.; Morris, R. 1993. Radial variation in wood specific gravity, fiber lengths and vessel area for two Central American hardwoods: *Hyeronima alchornoides* and *Vochysia guatemaltensis* natural and plantation-grown trees. *IAWA J.* 14: 153-162.

Cai, Y.; Hayashi, K. 2007. New monitoring concept of moisture content distribution in wood during RF/vacuum drying. *Journal of Wood Science.* 53: 1-4.

Calvo-Alvarado, J.C.; Arias, D.; Ritcher, D.D. 2007. Early growth performance of native and introduced fast growing tree species in wet to sub-humid climates of the Southern region of Costa Rica. *Forest Ecology Management* 242: 227-235.

Forest Products Laboratory. 1999. Wood handbook—Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, For. Prod. Lab. Madison, 450 p.

González, E.; Fisher, R. 1998. Variation in selected wood properties of *Vochysia guatemalensis* from four sites in Costa Rica. *For. Sci.* 44: 185-191.

Gu, H.; Young, T.M.; Moschler, W.W.; Bond, B.H. 2004. Potential sources of variation that influence the final moisture content of kiln-dried hardwood lumber. *Forest Products Journal* 54(11):65-70.

Hallock, H.Y.; Malcolm, F.B. 1972. Sawing to reduce warp in plantation red pine studs. Research paper FLP-164. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison.

Ikami, Y.; Matsumura, Y.; Tsuchikawa, S. 2009. Influence of pith location on warp of lumber in sawing medium-quality sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) logs. *European Journal of Wood and Wood Products*. 67(3): 271-276.

Keey, R. 2005. Colour development on drying. *Maderas Ciencia y Tecnología*. 7: 3-16. Klaiber, V.; Seeling, U. 2004. The influence of drying method on the warp behavior of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) sawn timber. *Forest Products Journal*. 54(4): 79-87.

Luostarinen, K.; Möttönen, V. 2004. Effect of growing site, sampling date, wood location in trunk and drying method on concentration of soluble proanthocyanidins in *Betula pendula* wood with special reference to wood colour. *Scandian Journal of Forests Research* 19: 234-240.

Milota, M.R. 1992. Effect of kiln schedule on warp in Douglas-fir lumber. *Forest Products Journal*. 42(2): 57-60.

Milota, M.R. 1996. Method of measurement of bow and crook. *Forest Products Journal* 41(9): 65-68.

Möttönen, V. 2006. Variation in Drying Behavior and Final Moisture Content of Wood during Conventional Low Temperature Drying and Vacuum Drying of *Betula pendula* Timber. *Drying Technology* 24: 1405 – 1413.

Moya, R.; Muñoz, F. 2008. Wet pockets in kiln-dried *Gmelina arborea* lumber. *Journal of Tropical Forest Science*. 22 (3): 317-328.

Moya, R.; Tomazello, M. 2008. Variation in the wood anatomical structure of *Gmelina arborea* trees at different ecological conditions in Costa Rica. *Revista Biología Tropical* 56(2) 689-704(2008).

Moya, R.; Leandro, L.; Murillo, O. 2009. Wood characteristics of *Terminalia amazonia*, *Vochysia guatemalensis* and *Hyeronima alchorneoides* planted in Costa Rica. *Bosques* 30: 78-87

Moya, R.; Muñoz, F. 2010. Physical and mechanical properties of eight species growing in fast growth plantations in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science*. 22 (3): 317-328.

Moya, R.; Ureña, E.; Salas, C.; Muñoz, F. 2011a. Kiln drying defects presence and grouping of wood from ten tropical species growing in fast-growth plantation. Wood material science and engineering (Submit).

Moya, R.; Aguilar, D.; Tenorio, C.; Bond, B. 2011b. Variation of moisture content in kiln dried plantation grown lumber of *Vochysia guatemalensis*. Wood fiber and science (Submit).

Muñoz, F.; Moya, R. 2008. Moisture content variability in kiln-dried *Gmelina arborea* wood: effect of radial position and anatomical features. Journal of Wood Science. 54: 318-322.

Ofori, J.; Brentuo, B. 2005. Green moisture content, basic density, shrinkage and drying characteristics of the wood of *Cedrela odorata* grown in Ghana. Journal Tropical of Forest Science 17: 211–223.

Qumruzzaman, C.; Iftekhar, S.; Mahbulul, A. 2005. Effects of age and height variation on physical properties of mangium (*Acacia mangium* Willd) wood. Australian Forestry. 68: 17-19.

Rubin, S.; Joseph, D. 2007. Influence of sawing solution and pith location on warp in 2 by 4 lumber sawn from small-diameter loblolly pine stems. Forest Products Journal 57(7/8): 73-75.

Simpson, W. 1991. Properties of wood related to Drying. In: Simpson W (ed) Dry Kiln Operator's Manual Handbook AH-188. USDA. Forest Service. Forest Products Laboratory. WI. pp I1-I50.

Simpson, W. 1999. Drying and control of moisture content and dimensional changes. In Wood Handbook- Wood as an Engineering Material. Gen. Tech. Reo. FPL-GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463p.

Solis, M.; Moya, R. 2004. *Vochysia guatemalensis* en Costa Rica. FONAFIFO. Ministerio de Energía y Minas. Gobierno de Costa Rica. San José, Costa Rica. 107 p.

Tenorio, C.; Moya, R. 2010. Factores de variación del contenido de humedad, color y defectos en la madera de *Acacia mangium* (Willd) antes y después del secado. Drying Technology (A someter).

Yamamoto, K.; Sulaiman, O.; Kitingan, C.; Choon, L.; Nhan, N. 2003. Moisture distribution in stems of *Acacia mangium*, *A. auriculiformis* and hybrid acacia trees. Japan Agricultural Research Quarterly 37 (3): 207-212.

Zobel, B.J. 1984. The changing quality of the world wood supply. Wood Science Technology. 18: 1-17.

Zobel, B.J.; Sprague, J.R. 1998. Juvenile Wood in forest trees. Springer Verlag, New York, USA, 299p.

Anexo 5: Artículo científico: Moya, R; Tenorio, C; Aguilar-Tovar, D. 2010. Algunos aspectos a considerar para el secado convencional de la madera de *Vochysia guatemalensis* Donn Sm. (cebo/mayo). Revista Forestal Kurú. (Sometido).

Algunos aspectos a considerar para el secado convencional de la madera de *Vochysia guatemalensis* Donn Sm. (cebo/mayo)

Roger Moya Roque¹
Carolina Tenorio Monge²
Diana Aguilar Tovar³

Resumen

La madera de *Vochysia guatemalensis* Donn Sm. actualmente es obtenida de plantaciones forestales en varias regiones de Costa Rica. Esta madera presenta el problema de una alta variabilidad en el contenido de humedad final y alta presencia de defectos luego del proceso de secado. Se han investigado las causas de esta variación y el desarrollo de estos defectos y se ha encontrado que los principales factores son: alta variabilidad en el contenido de humedad inicial de la madera en diferentes partes del árbol y programas de secado inapropiados. Así mismo se dan una serie de recomendaciones a considerar antes de iniciar el secado y de esta manera lograr una mejor calidad de madera en cuanto a la variabilidad de la humedad final y la presencia de defectos.

Different aspects to consider in kiln dry of *Vochysia guatemalensis* Donn Sm. wood (cebo/mayo)

Summary

Vochysia guatemalensis Donn Sm. wood is currently provided of plantations in several regions of Costa Rica. This wood presents high variability in the final moisture content and high incidence of defects after drying. We have investigated the causes of this variation and defect developments. It was found that the main factors affects the variability and drying defects are: high and variability in initial moisture content of lumber by different moisture content in different parts of the tree and improper drying programs. Besides, there are recommendations to consider before starting the drying process. Thus a better wood quality in relation to moisture content variability and the presence of defects can be obtained after drying process.

¹ Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, email: rmoya@itcr.ac.cr

² Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, email: ctenorio@itcr.ac.cr

³ Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Forestal, e-mail: dimagui5@hotmail.com

Introducción

La especie *Vochysia guatemalensis*, en la actualidad es de gran aceptación en los programas de reforestación comercial, de pequeños y medianos finqueros de Costa Rica (Calvo-Alvarado et al., 2007). En plantaciones es considerada de rápido crecimiento y se adapta muy bien en sitios con suelos degradados (Calvo-Alvarado et al., 2007). Así mismo, es considerada una especie pionera en la recuperación de bosques degradados y con gran potencial de aprovechamiento (Montagnini, 2007).

Sin embargo, en las primeras experiencias de industrialización de la madera provenientes de plantaciones, tanto de árboles de raleos como de cosecha final, se han encontrado severos problemas en la calidad de la madera aserrada seca, siendo entre ellos, la falta de uniformidad del contenido de humedad final (CHF), y la alta incidencia de defectos de secado como torceduras, rajaduras, grietas y colapso en la madera (Moya et al., 2008).

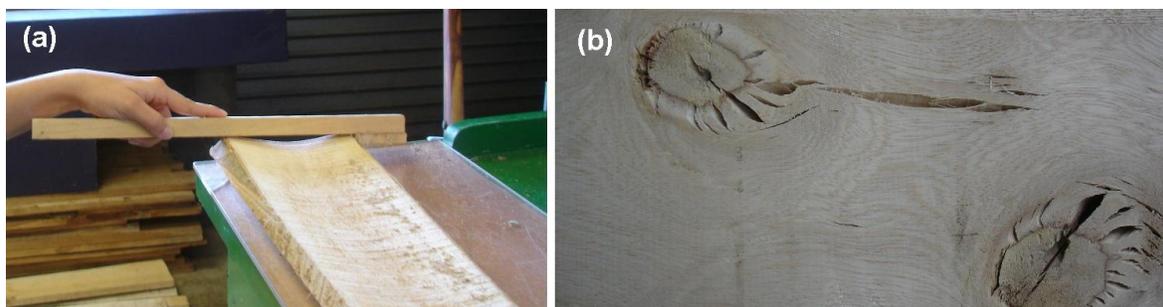


Figura 1. Acanalado en madera secada al horno, defecto común que se presenta en madera aserrada de 10 cm de ancho, y presencia de rajaduras y grietas asociadas a nudos en madera seca provenientes de árboles de rápido crecimiento de *V. guatemalensis*

Desarrollo

Con la finalidad de ayudar al sector industrial es que seguidamente se presentan 5 aspectos relevantes que influyen sobre el desarrollo del proceso de secado de la madera aserrada de *V. guatemalensis*, y basados en esto se recomiendan una serie de aspectos que permitirían mejorar la calidad de madera seca en lo referente a contar con un CHF uniforme y madera con poca presencia de torceduras, rajaduras, colapso o grietas.

1. La madera de *V. guatemalensis* presenta alto contenido de humedad inicial.

Un inconveniente en el secado de la madera de *V. guatemalensis* es que presenta un alto contenido de humedad inicial (CHI), en promedio de 156%, siendo una de las especies de

plantación con alta humedad. Así mismo, otro inconveniente de la especie es su alta variabilidad entre el valor mínimo y el valor máximo (Cuadro 1). La procedencia de la madera puede afectar el desempeño en el secado, ya que por lo general la madera de árboles que crecen en sitios con clima seco, como la región de Pacífico Norte y Pacífico Central de Costa Rica, producen madera con un CHI mayor, aproximadamente 15% más, que la madera proveniente de árboles de plantaciones con clima húmedo. Igualmente en ambas regiones se presenta alta variabilidad entre el valor mínimo y valor máximo (cuadro 1).

Cuadro 1. Contenido de humedad inicial promedio y su variación para la madera de *V. guatemalensis* de árboles de plantaciones forestales

Condición		Promedio de humedad inicial (%)	Variación del contenido de humedad inicial de la madera
Promedio general		159	De 98% a 281%
Madera obtenida de árboles en:	Zona húmeda	151	De 107% a 276%
	Zona Seca	166	De 98%-281%

2. Variación del contenido de humedad inicial con la altura del árbol y en sentido médula – corteza.

En lo referente a la variación en diferentes alturas el árbol, se tiene el inconveniente que la madera proveniente de las partes altas del árbol presentan un CHI superior a la madera que es extraída de las partes bajas de los árboles (Figura 3a). Este comportamiento no es común que se presenten en maderas de plantaciones ya que en la mayoría de las especies el CHI disminuye al incrementar la altura. Con relación a la variación en sentido médula-corteza se tiene que cuando la troza esta compuesta de solo madera de albura se tiene la ventaja que el CHI es relativamente uniforme o de poca variación. No obstante esta ventaja, se ve notablemente reducida cuando en una misma tabla se presenta madera de albura y madera de duramen. El CHI de la madera aumenta al incrementar el porcentaje de madera de duramen en la sección transversal (Figura 3b). Esto trae el inconveniente de que, en una misma tabla con madera albura y duramen, la parte que contiene albura se secará más rápido que aquella parte de la tabla que contiene madera duramen.

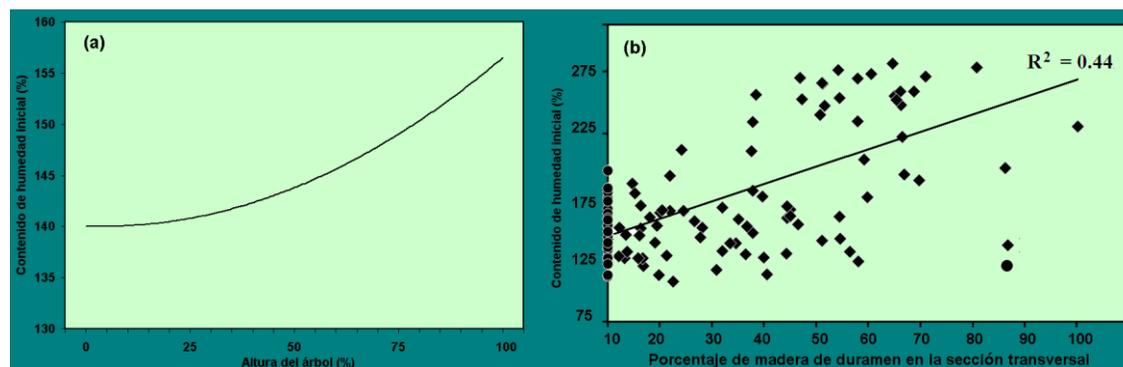


Figura 3. Variación del contenido de humedad inicial de la madera en diferentes alturas del árbol y con el porcentaje de presencia de madera de duramen en sentido transversal.

3. Variación de velocidad de secado entre madera con corte radial y madera con corte tangencial

En el aserrío de trozas de plantación se producen 4 tipos de tablas: madera exclusivamente tangencial (Figura 4a), tablas exclusivamente radial (Figura 4b), tablas combinado tangencial-radial (Figura 4c) y tablas con una composición radial-tangencial-radial (Figura 4d). En estos cortes de madera se tiene el inconveniente que cada uno de ellos poseen diferentes velocidades de secado, siendo la madera de corte tangencial de más rápido secado que la madera de corte radial. Esto significa que la tabla de corte tangencial (Figura 4a) secará más rápido que la tabla de corte radial (Figura 4b) si son secado en un mismo lote de madera. Este factor tiene el inconveniente que en las tablas que contiene los dos tipos de corte (patrón radial-tangencial en figura 4c y patrón radial-tangencial-radial en figura 4d) la parte de la tabla con corte tangencial secará más rápido que la parte de la tabla con corte radial. Esto provoca una diferencia en el CHF en una misma tabla.

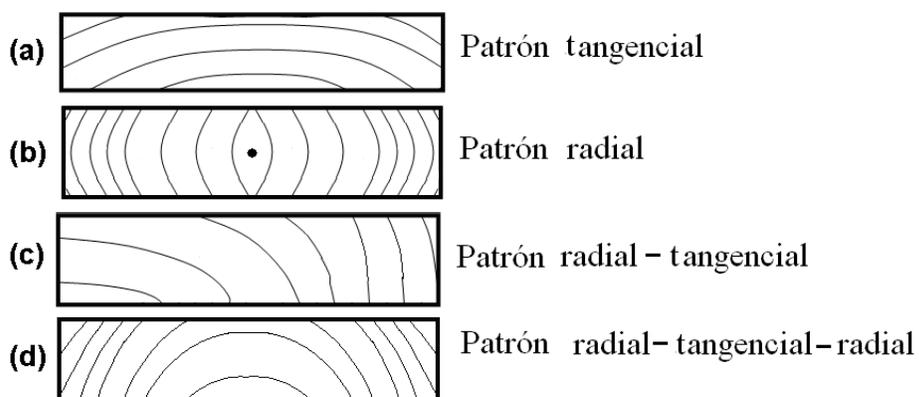


Figura 4. Diferentes cortes presentes en una pieza de madera. (a) corte totalmente tangencial, (b) corte totalmente radial, (c) madera con dos tipos: radial-tangencial y (d) madera con 3 tipos de corte: radial-tangencial-radial.

4. Selección del programa de secado a utilizar

En Costa Rica, en el Instituto Tecnológico de Costa Rica se han experimentado dos programas de secado, los cuales uno se denomina de secado rápido, comúnmente utilizado en la madera proveniente de bosque natural y que es recomendado por Boone et al. (1988) y un segundo programa denominado de secado lento, en donde se diferencia del anterior programa por la utilización de un contenido de humedad de equilibrio alto dentro de la cámara al inicio del secado (Cuadro 2). Al utilizar el programa de secado rápido, se tiene la ventaja de que la cantidad de días para secar la madera es 30% menor que la cantidad de días que se necesitan para secar la madera con el programa de secado lento. Sin embargo se

tiene el inconveniente de que en la madera seca se produce alta variación del CHF, desarrollo de bolsas de humedad (Figura 5) y una mayor presencia de defectos de secado.

Cuadro 2. Diferentes programas de secado utilizados en el secado convencional de *V. guatemalensis*

Etapa de secado	Secado rápido*			Secado lento		
	TBS (°C)	CHE (%)	CH (%)	TBS (°C)	CHE (%)	CH (%)
Calefacción	35	14.8	-	35	18.0	-
Secado	38	14.3	50	38	17.0	50
	38	11.9	45	38	15.0	45
	38	11.9	35	38	13.0	35
	43	10.5	30	44	11.0	30
	44	7.6	30	44	9.0	30
	49	5.5	25	49	7.0	25
	55	4.0	20	55	5.0	20
	66	3.2	15	66	3.2	15
	66	3.2	12	66	3.2	12
	Igualación	66	3.2	11	66	3.2
Acondicionamiento	60	3.5	-	60	3.5	-
Enfriamiento	30	3.5	-	30	3.5	-

*Programa propuesto por Boone et al. (1988).

Legenda: TBS=Temperatura de bulbo seco, CHE: contenido de humedad de equilibrio, CH: Contenido de humedad de la madera

5. Alta variación del contenido de humedad final de la madera luego del secado

En la madera de *V. guatemalensis* que ha sido secada ocurre una variación del CHF, dentro de las principales causas a esta variación están:

- Posición de la tabla respecto a la posición de la médula: las tablas que se obtienen cerca de la médula son de más rápido secado que las tablas cerca de la corteza, por lo que en caso de secar en un mismo proceso, las tablas obtenidas próxima a la médula, resultarán con menor CHF después del secado que las tablas cerca de la corteza.
- Las tablas con un alto porcentaje de madera de duramen en la sección transversal, en caso de que sean secadas junto con tablas con albura, terminan con un CHF luego del secado mayor que la madera de albura.
- La madera de *V. guatemalensis* es propensa a producir bolsas de humedad en la madera seca (Figura 5). Estas bolsas se presentan en la sección transversal, a todo lo largo de la tabla y se desarrollan casi exclusivamente en tablas con corte radial

(Figura 5a, 5b y 5c). Las tablas que poseen este problema pueden presentar un contenido de humedad final promedio que puede variar entre 12% y 35%.



Figura 5. Bolsa de humedad presente en madera seca de *V. guatemalensis*, principalmente en la región con corte radial

- d. Hemos mencionado que las tablas que contengan madera con corte radial (Figura 5b, 5c y 5d) son de más lento secado que las tablas con corte radial, esto nos indica que aquellas tablas con alguna sección con corte radial son propensas a terminar con CHF mayor que la sección tangencial en un mismo lote de secado.

Recomendaciones para mejorar la calidad del secado de la madera de *V. guatemalensis*

Con el fin de mejorar o disminuir la variabilidad del CHF y los defectos de secado en el secado de la madera, se dan las siguientes recomendaciones:

1. Durante el aprovechamiento de los árboles de plantaciones es recomendable separar las trozas de las partes altas de las partes bajas (50% de la altura total), ello para que en el proceso aserrío sea llevado a cabo en forma separada y así obtener dos lotes para secar: un lote de la madera de la parte inferior del árbol y el otro de la parte superior del árbol. Luego cada lote se debe secar por separado.
2. Es recomendable, si es posible, hacer lotes separando, en su totalidad, la madera de albura y la madera con presencia de duramen. El secar estos dos tipos de madera por separado disminuye las diferencias en el contenido de humedad final y se optimiza el tiempo de secado para cada tipo de madera.
3. Separar la madera con corte tangencial de las madera de tipo radial, para secar estas en procesos de secado diferentes. En el caso de secar estas dos especies en un mismo lote se debe colocar las sondas de control en la madera con corte radial.

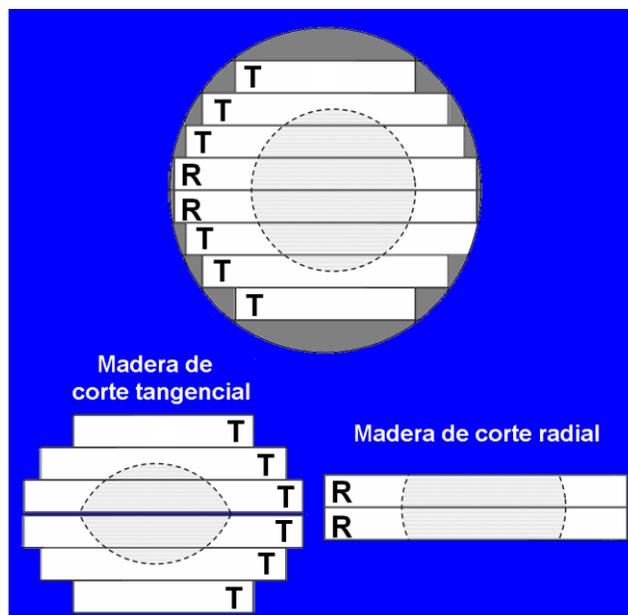


Figura 6. Separación de madera por tipo de corte (tangencial o radial).

4. Utilizar programas de secado en donde se empleen altas humedades relativas al inicio del secado, y temperaturas medias, como el programa de secado mostrado en la tabla 1 y de preferencia el denominado secado lento.
5. Colocar los pines de control en la región de madera radial, esto porque este tipo de madera es de más lento secado que la madera de corte tangencial.



Figura 7. Colocación de la sondas de control de contenido de humedad. Observe que en la tabla presenta madera radial y tangencial, la sonda fue colocada en la parte de madera radial.

Bibliografía

- Boone R, Charles J, Kozlik P, Bois J, Wengert E (1988) Dry Kiln Schedules for Commercial Woods: Temperate and Tropical. General Tech Report FPL-GTR-57. USDA Forest Service Forest Products Laboratory, Madison, WI. 158 pp.
- Calvo-Alvarado, J.C., Arias D. & Ritcher, D.D. 2007. Early growth performance of native and introduced fast growing tree species in wet to sub-humid climates of the Southern region of Costa Rica. *Forest Ecology Management* 242: 227-235.
- Montagnini, F. 2007. Management for sustainability and restoration of degraded pastures in the neotropics. In: Wyster, R. (Eds). *Post-Agricultural succession in the neotropics*. Springer-Verlag, New York, pp. 265-297.
- Moya, R., Urueña, E. & Muñoz, F. 2008. Modulation of moisture content in conventional kiln of wood from fast-growing tropical species in plantation. CD. SWST, L. (ed). *Proceedings SWST Annual Meeting*. 10-12 de noviembre de 2008. Concepción – Chile. pp.45-52.

Anexo 6: Artículo científico: Tenorio, C; Moya, R. 2010. Consideraciones y recomendaciones prácticas para mejorar la calidad de la madera seca de *Acacia mangium* Willd. Tecnología en Marcha. (Sometido).

Consideraciones y recomendaciones prácticas para mejorar la calidad de la madera seca de *Acacia mangium* Willd.

Carolina Tenorio Monge¹
Roger Moya Roque²

Resumen

Acacia mangium es actualmente una de las especies más utilizadas en plantaciones comerciales en Costa Rica. Sin embargo, los usos de su madera han sido restringidos debido a que presenta algunos problemas durante el proceso de secado artificial, entre los que destaca la alta variabilidad del contenido de humedad final, la alta incidencia de defectos y la presencia de bolsas de humedad. Se han investigado las causas de esta variación y del desarrollo de estos defectos y se ha encontrado que los principales factores que influyen en estos son: alta variabilidad en el contenido de humedad inicial de la madera, la procedencia de la materia prima, la altura, la posición radial de la tabla al extraerla del árbol y el uso de programas de secado inadecuados para la especie. Así mismo se dan una serie de recomendaciones a considerar antes de iniciar el secado artificial y de esta manera lograr una mejor calidad de madera en cuanto a la variabilidad del secado y la presencia de defectos.

Palabras clave: contenido de humedad, defectos, bolsas de humedad, programas de secado.

Different aspects and recommendations to consider for quality improvement of dried lumber of *Acacia mangium* Willd.

Summary

Acacia mangium is currently is currently one of the most used species in commercial plantations in Costa Rica. However, the use of timber have been limited because it presents some problems during the kiln drying, such as high variability of final moisture content, high incidence of dry defects and development of wet pockets in dried-lumber We have investigated the causes of this variation and the development of these defects. It was found that mainly factors affected this problems are: high variability in initial moisture content in lumber, radial and high position where the board came from, and inadequate drying schedule. Also there are a number of recommendations to consider before starting the drying and in this way obtain a better quality of wood in relation to the variability of moisture content and the presence of dry defects.

Key words: moisture content, defects, wet pockets, drying schedules.

¹ Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, email: ctenorio@itcr.ac.cr

² Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, email: rmoya@itcr.ac.cr

Introducción

Acacia mangium ha pasado de ser una especie desconocida y con usos muy limitados en Costa Rica, a ser una de las más populares especies plantadas en las regiones tropicales (Arisman *et ál.*, 2006), esto atribuido a su rápido crecimiento, a la calidad de su madera (Yamamoto *et ál.*, 2003) y a su tolerancia a sitios degradados, quemados y a suelos agrícolas abandonados (Shah Newaz *et ál.*, 2005). No obstante, la utilización de madera de árboles de plantaciones muestra problemas en la calidad de la madera aserrada y en algunos procesos industriales. Por ejemplo, Yamamoto *et ál.* (2003) estudiando el contenido de humedad en condición verde de *A. mangium*, encontraron valores extremadamente altos, de 253% en duramen y 154% en la albura y fue sugerido que este alto valor de humedad se debe a la presencia de “duramen húmedo” y a factores propios de la madera durante el proceso de secado (Yamamoto *et ál.*, 1997; Larcher, 1995).

Más recientemente se han señalado problemas en los procesos de secado de la madera de *A. mangium* (Moya *et ál.*, 2008; Barsi y Wahyudi, 2007 y 2009, Lim *et ál.*, 2003; Piao *et ál.*, 2000). Moya *et ál.* (2008) encontraron que la madera de *A. mangium* presenta un mayor incremento en los defectos (grietas, acanaladuras y encorvaduras) después de secado convencional, en comparación con otras especies de plantaciones de rápido crecimiento de regiones tropicales de Costa Rica. Así mismo dichos autores encontraron una alta variación en el contenido de humedad final luego del secado. Barsi y Wahyudi (2007) estudiando también varias especies tropicales del Oeste de Papua encontraron que *A. mangium* es una madera con alta presencia de defectos, susceptible a producir grietas, torceduras y reventaduras luego del secado. Lim *et ál.* (2003) haciendo referencia al secado convencional de *A. mangium* menciona la existencia de problemas de secado y propone que para reducir estos defectos realizar un presecado al aire de la madera antes de proceder a secar la madera al horno. En tanto Piao *et ál.* (2000) contrario a los otros autores mencionan que la especie es de fácil secado, pero con incidencia a colapso y reventaduras, y también sugieren que realizar un presecado al aire antes de secar el cual debe acompañarse por un secado lento.



Figura 1. Reventaduras en la madera aserrada de *A. mangium* luego del secado convencional. (Foto: Carolina Tenorio)

Debido a la alta importancia de *A. mangium* como especie de reforestación en Costa Rica y en otros países de la región tropical, a los posteriores usos de la madera, y a la poca información e incongruencia que existe en las causas de variación del contenido de humedad antes y después del secado convencional, así como a la incidencia de defectos, es que el presente trabajo tiene la finalidad de presentar algunos aspectos relevantes y recomendaciones que se deben considerar para el secado de madera de *A. mangium* proveniente de plantaciones forestales en cámaras de secado convencional. La información acá suministrada permitirá mejorar la calidad de madera seca en lo referente a contar con contenidos de humedad uniformes y madera con poca presencia de torceduras, rajaduras o grietas.

Desarrollo

La madera de *A. mangium* una vez seca presenta buenas características de resistencia mecánica y de trabajabilidad, no obstante como se ha señalado presenta problemas durante el proceso de secado. Con la finalidad de mejorar la calidad de esta madera en lo relacionado al contenido de humedad final (luego del secado) y disminuir la presencia de defectos que desecharían la madera aserrada, se enumeran a continuación aquellos factores que inciden en estos aspectos.

Estos factores fueron divididos en tres tipos de consideraciones, el primero relacionado a la madera proveniente del proceso del aserrío que comúnmente es llamada madera verde, el segundo factor que se desarrolla es el de la relación madera-proceso industrial de secado y el finalmente el tercero, el de los aspectos relevantes que determinan el contenido de humedad y la presencia de defectos de la madera aserrada después del secado.

1. Consideraciones generales de la madera aserrada de *A. mangium* antes del proceso de secado.

1.1. La madera recién cortada presenta alto contenido de humedad inicial.

La madera de *A. mangium* presenta un contenido de humedad inicial (CHi) en promedio de 126%, valor considerado como muy alto si se compara con otras maderas. Así mismo, otro inconveniente que presenta la especie es la alta variabilidad, el cual pueden variar de 110 a 150% (Cuadro 1). La procedencia o región donde crece el árbol afecta el CHi. Por ejemplo madera creciendo en la Zona Norte con clima tropical muy húmedo presenta CHi más altos que madera proveniente del Pacífico Central, la cual presenta un clima tropical húmedo. (Cuadro 1).

Cuadro 1. Contenido de humedad inicial promedio y su variación para la madera de *A. mangium* de árboles de plantaciones forestales.

Condición	Promedio de humedad inicial (%)	Variación del contenido de humedad inicial de la madera
Promedio general	126,6	58,1% a 185,9%
Procedencia		
San Carlos	138,9	83,6% a 178,6%
Parrita	117,9	58,1%-185,9%

1.2. Variación del contenido de humedad inicial con la altura del árbol y en sentido médula – corteza.

La madera aserrada de *A. mangium* presenta el inconveniente de que posee una alta variación del CHi con la altura del árbol (Figura 2a). La madera proveniente de las partes altas del árbol presentan un CHi inferior al de la madera que es extraída de las partes bajas de los árboles. Esta diferencia es de aproximadamente la mitad entre la parte alta y la parte baja (Figura 2a). No obstante, se tiene la ventaja de que en los árboles de *A. mangium* el CHi es uniforme o de poca variación en sentido médula-corteza (Figura 2b), y que además en los árboles de esta especie no existe variación en el CHi por la presencia de madera de albura o duramen. Estos dos factores producen que la madera aserrada de una misma altura en el árbol no presente grandes diferencias de CHi, lo cual podría favorecer los procesos de secado si se realiza adecuadamente.

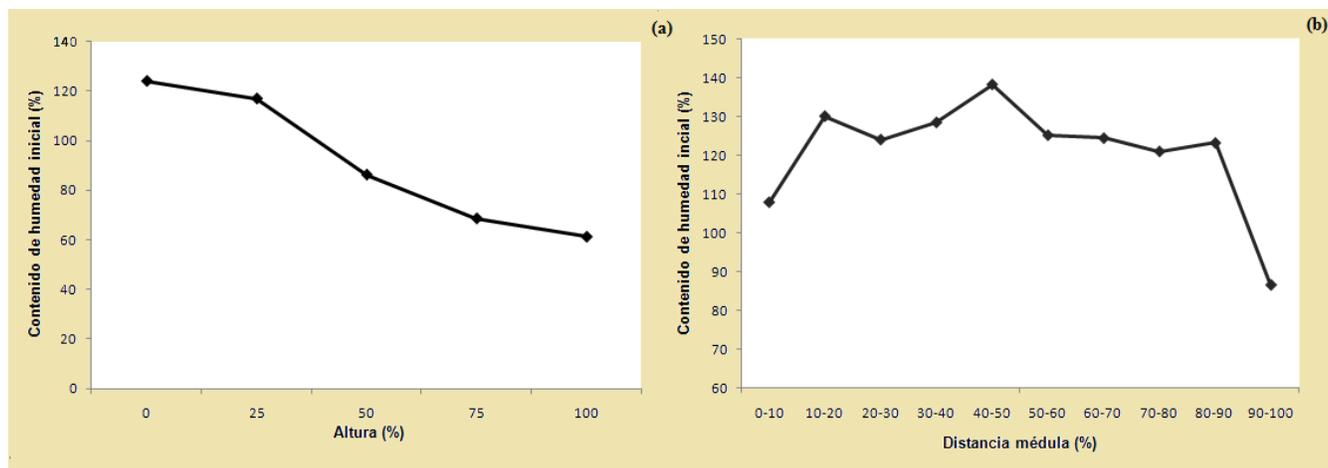


Figura 2. Variación del contenido de humedad inicial de la madera de *A. mangium* por altura comercial del árbol (a) y en médula-corteza (b), para una plantación de nueve años de edad.

1.3. El proceso de aserrío de trozas de *A. mangium* de plantaciones producen torceduras, grietas y rajaduras.

Durante el proceso de aserrío en la madera de *A. mangium* se tienden a producir una alta incidencia de defectos como lo son alabeos, arqueaduras y encorvaduras (Figura 5). En estimaciones realizadas en investigaciones se encontró que la madera al salir del proceso de aserrío tiende a presentar defectos como alabeos en el 65% de las piezas, encorvaduras en el 70% y reventaduras en el 35%. Otros tipos de defectos están presentes en la madera verde, no obstante la incidencia es baja (Figura 5). La presencia de madera juvenil es la causante de que la madera de árboles de cortas edades (inferiores a 10 años) sea propensa a presentar más defectos, esto debido a que las tensiones a las que se ven sometidos los árboles durante su crecimiento son liberadas durante el proceso de aserrío, lo que provoca una mayor presencia de defectos como los mencionados anteriormente.

2. Consideraciones durante el secado convencional de la madera aserrada de *A. mangium*.

2.1. Selección del programa de secado a utilizar

En Costa Rica, en el Instituto Tecnológico de Costa Rica se han experimentado dos programas de secado. Uno contempla la combinación de los programas de secado T3-D2 y T8-D2 (Cuadro 2) propuestos por Boone *et ál.* (1988), el cual se caracteriza por usar baja temperatura y bajo contenido de humedad de equilibrio (CHE) dentro de la cámara de secado y un segundo programa que contempla un mayor contenido de humedad de equilibrio (CHE) y una mayor temperatura en relación al programa anterior. Este último programa de secado tiene la ventaja de que la cantidad de días para secar la madera es menor que la cantidad de días que se necesitan para secar la madera con el programa de

baja temperatura y bajo CHE. Sin embargo, en ambos casos se tiene el inconveniente de que en la madera seca se produce una alta variación del CHF y el desarrollo de bolsas de humedad (Figura 4), pero estos disminuyen con el programa de alta temperatura y humedad relativa.

Cuadro 2. Programas de secado utilizados en el secado convencional de *A. mangium*

Etapa de secado	Secado de contenido de humedad y temperatura baja			Secado de contenido de humedad y temperatura alta		
	TBS °C	CHE %	CH %	TBS °C	CHE %	CH %
Calefacción	40		-	45		-
	42	18.5	-	50	19.5	-
Secado	44	18.5	55	55	18.5	55
	44	17.6	50	55	17.6	50
	44	17.0	45	55	17.0	45
	44	16.3	40	55	16.3	40
	44	13.6	35	55	13.6	35
	44	9.9	30	55	10.1	30
	49	5.5	25	60	5.8	25
	55	4.0	20	66	4.0	20
	60	2.9	15	71	3.4	15
	71	3.5	12	82	3.5	12
Igualización	71	10	10	82	10	10
Acondicionamiento	71	13	-	82	12	-
Enfriamiento	40	-	-	40	-	-

Legenda: TBS=Temperatura de bulbo seco; CHE= Contenido de humedad de equilibrio dentro de la cámara; CH= contenido de humedad en la madera

2.2. Variación de velocidad de secado entre madera con corte radial y madera con corte tangencial

En el aserrío de trozas de plantación, por tratarse de trozas de diámetro pequeño, se producen 4 tipos de tablas que combinan o no la madera de corte radial con la de corte tangencial y estos tipos son: tablas con corte exclusivamente tangencial (Figura 3a), tablas con corte exclusivamente radial (Figura 3b), tablas oblicuas tangencial-radial (Figura 3c) y tablas combinadas radial-tangencial-radial (Figura 3d). En las tablas que combinan la sección radial y la tangencial, se tiene el inconveniente de que cada una de ellas poseen diferentes velocidades de secado, siendo la madera de corte tangencial de más rápido secado que la madera de corte radial, por tanto este es un factor que influye en el secado. Es de esperar que las tablas de corte tangencial (Figura 3a) sequen más rápido que la tabla de corte radial (Figura 3b) cuando estos dos tipos de tablas son secadas en un horno

convencional en un mismo lote de madera. Así mismo, este factor tiene el inconveniente que en las tablas compuestas de dos o más cortes como las tablas oblicuas (Figura 3c) y combinadas (Figura 3d), la parte de la tabla con corte tangencial secará más rápido que la parte de la tabla con corte radial, provocando nuevamente una diferencia en el CHF en una misma tabla al final del proceso de secado.



Figura 3. Diferentes patrones de corte presentes en las tablas de Acacia de árboles de plantación. (a) tablas con corte exclusivamente tangencial, (b) tablas con corte exclusivamente radial, (c) tablas con corte oblicuo: tangencial-radial y (d) tablas con corte combinado: radial-tangencial-radial. (Foto: Carolina Tenorio)

3. Consideraciones de la madera de *A. mangium* luego del proceso de secado.

3.1. Alta variación del contenido de humedad final de la madera luego del secado y presencia de defectos de secado.

La madera de *A. mangium* es propensa a la presentar una alta variación del contenido de humedad final (CHF) luego del proceso de secado, los cuales pueden variar desde 9 a 52%. Aunque esta variación del CHF esté presente en todo proceso de secado, debe ser minimizada para mejorar la estabilidad de la madera y la calidad del producto final. Esta falta uniformidad en el CHF puede tener un impacto significativo en el procesamiento secundario de la madera y en el desempeño final del producto.

Las principales causas de esta variación se deben a diversos factores como: (i) CHI muy altos los cuales provocan un proceso de secado más extenso e irregular y dan origen a CHF por encima del contenido de humedad programado, (ii) aunque se presente un CHI uniforme en sentido médula-corteza, la velocidad de secado es diferente en este sentido, lo que provoca que las tablas que se obtienen cerca de la corteza resulten con un menor CHF después del secado que las cercanas a la médula y (iii) las tablas que contienen madera con corte radial (Figura 3b) son de más lento secado que las tablas con corte tangencial (Figura

3a), de modo que aquellas tablas con alguna sección con corte radial son propensas a terminar con CHF mayores que la sección tangencial en un mismo lote de secado.

3.2. La madera de *A. mangium* es propensa a producir bolsas de humedad en la madera seca.

Las bolsas de humedad son conocidas también como bolsas de agua, en donde se presentan contenidos de humedad superiores al deseado. Las bolsas de humedad en la madera seca de *A. mangium* se pueden observar transversalmente y en todo lo largo de la tabla y se caracterizan por poseer un color más oscuro donde se concentra la humedad en comparación con la región de la tabla que se encuentra seca. Las tablas que poseen este problema pueden presentar un contenido de humedad que puede variar entre 9 y 52%.

Entre los factores que propician el desarrollo de estas bolsas de humedad se encuentran el clima o procedencia de la madera, el tipo de secado y el patrón de corte. Las bolsas se concentran principalmente en las tablas con corte radial, específicamente en tablas con cortes combinados (Figura 3d), en tablas provenientes de zonas muy húmedas y obtenidas de programas de secado de baja humedad y temperatura dentro de la cámara.



Figura 4. Bolsa de humedad presente en madera seca de Acacia, principalmente en la región con corte radial. (Foto: Carolina Tenorio)

3.3. Presencia de defectos en la madera de *A. mangium* después del secado.

Luego del proceso de secado, los defectos de alabeo y arqueadura se ven acentuado más de lo que se presentaban en la madera verde, pero la encorvadura, defecto de alta incidencia antes del secado, se disminuye en la madera seca, esto posiblemente como consecuencia de que las tensiones del secado se oponen y contrarrestan las tensiones de crecimiento liberadas durante el aserrío de las trozas (Serrano y Cassens, 2001). Otros defectos de secado, como arqueadura, grietas y acanaladura se presentan en la madera seca pero su incidencia es baja, a excepción del acanalado que llega alcanzar cerca del 45% (Figura 5).

Aunque la madera aserrada de *A. mangium* presenta una alta incidencia de defectos como alabeos, grietas, acanaladuras y rajaduras, estos se clasifican como leves y moderados, tanto

en la madera antes como después del secado. En tanto que defectos como encorvaduras y arqueaduras son catalogados como severos después del secado.

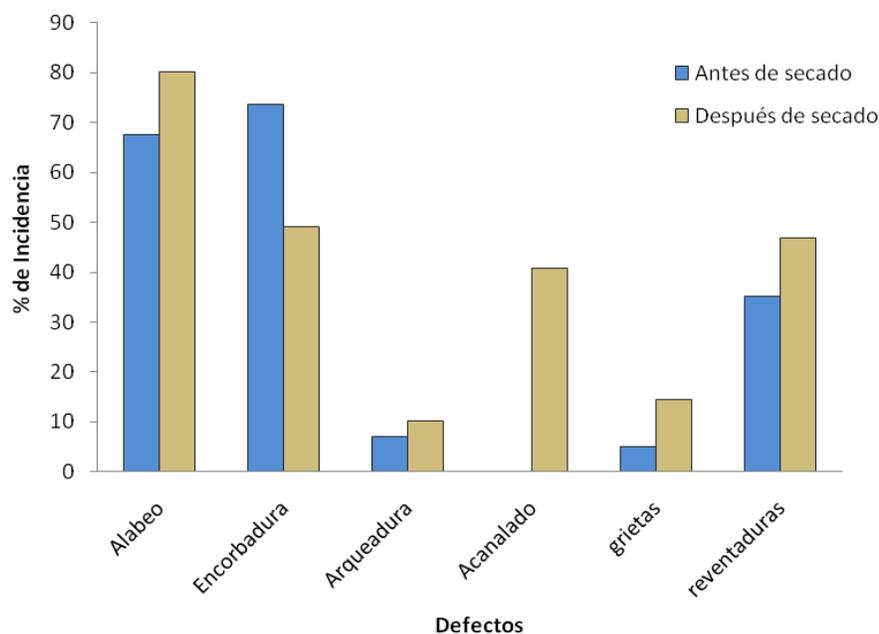


Figura 5. Porcentaje de incidencia de los defectos presentes en la madera seca de *A. mangium*

Recomendaciones en el momento de secado de la madera de Acacia.

Con el fin de mejorar o disminuir la variabilidad del CHF y los defectos de secado mencionados anteriormente, se dan las siguientes recomendaciones para el secado de la madera en horno convencional:

6. Durante el aprovechamiento de los árboles de plantaciones separar las trozas de las partes altas de las partes bajas, con la finalidad de que en el aserrío se separe la madera aserrada en dos lotes de secado: un lote de la madera proveniente de la parte inferior del árbol y otro proveniente de la madera de la parte superior del árbol y de esta manera secar dichos lotes procesos de secado diferentes.
7. Separar las tablas con corte tangencial de las tablas de corte radial (Figura 6) y de ser posible secar estas en lotes de secado diferentes. En el caso de secar estos dos tipos de tablas en un mismo lote se deben colocar las sondas de control de secado en una tabla con corte radial, o bien en la parte radial si la tabla es de corte combinado (Figura 7).

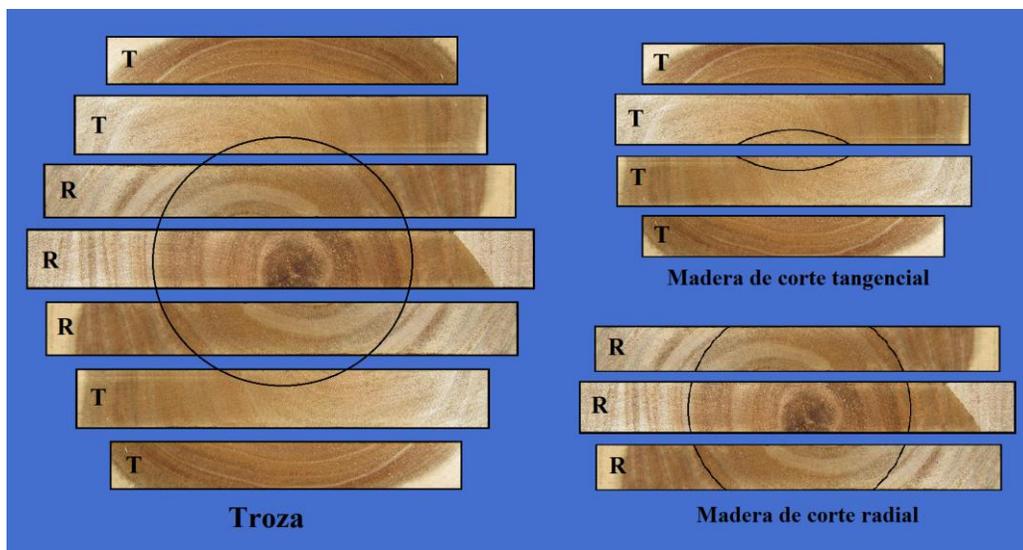


Figura 6. Recomendación para la separación de las tablas por tipo de corte (tangencial o radial). (Foto: Carolina Tenorio)

8. Colocar los pines de captura de la humedad de la madera en la región de corte radial de una tabla (Figura 7), esto debido a que este tipo de madera es de más lento secado que la madera con corte tangencial.
9. Utilizar programas de secado en donde se utilicen altas humedades relativas y altas temperaturas al inicio del secado dentro de la cámara. Un ejemplo de programa de secado puede ser similar al presentado en la tabla 2.



Figura 7. Colocación de la sondas de control de contenido de humedad. Observe que la tabla presenta corte radial y tangencial, la sonda fue colocada en la parte de madera radial. (Foto: Carolina Tenorio)

Bibliografía

Arisman, H; Hardiyanto, EB. 2006. *Acacia mangium* – a historical perspective on its cultivation. In: Potter, K; Rimbawanto, A; Beadle, C. (eds), Heart rot and root rot in tropical *Acacia* plantations. Proceeding of a workshop held in Yogyakarta, Indonesia, February 7-9, 2006, pp.11-15.

Basri, E; Wahyudi, T. 2007. The drying properties and schedules of five wood species from West Papua. *J.Iimu & Teknologi Kayu Tropics*. 5:57-62.

Boone, RS; Kozlik, CJ; Bois, PJ; Wengert, EM. 1988. Dry kiln schedules for commercial woods-temperate and tropical. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-57. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 158p.

Larcher, W. 1995. *Physiological Plant Ecology*. 3 rd ed. Springer, Berlin, Germany. 215-275.

Lim, S.C; Gan, K.S; Choo, K.T. 2003. The characteristics, properties and uses of plantation timbers rubberwood and *Acacia mangium*. Timber Technology Centre. Kepong. Kuala Lumpur.

Moya, R; Muñoz, F. 2008. Wet pockets in kiln-dried *Gmelina arborea* lumber. *Journal of Tropical Forest Science*. 22 (3): 317-328.

Moya, R; Muñoz, F. 2010. Physical and mechanical properties of eight fast growing plantation species in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science* 22 (3): 317-328.

Piao, CH; Teng-Tong, TL; Teng, T. 2000. Research on the drying of *Acacia mangium* lumber. *China Wood Industry* 14(1):16-18.

Serrano, J.R. and D. Cassens. 2001. Reducing warp and checking in plantation grown yellow poplar 4 by 4's by reversing part positions and gluing in the green condition. *Forest Products Journal* 51(11/12):37-40.

Shah, N; Kamaluddin, M; Manzoor, R. 2005. Growth and yield prediction models for hybrid acacia (*A. aculiformis* & *A. mangium*) grown in the plantations of Bangladesh. *Pakistan Journal of Biological Sciences*. 8: 1137-1141.

Yamamoto, K; Sulaiman, O; Hashim, R. 1997. Wetwood of *Acacia mangium* in Malaysia. In *JIRCAS Newls*, No. 12, ed. Kunio Tsubota, JIRCAS, Tsukuba, Japan, 5-6.

Yamamoto, K; Sulaiman, O; Kitingan, C; Choon, L; Nhan, N. 2003. Moisture distribution in stems of *Acacia mangium*, *A. auriculiformis* and hybrid acacia trees. *Japan Agricultural Research Quarterly* 37 (3): 207-212.

Anexo 7: Plegable: Guía Práctica #4: Algunos aspectos a considerar para el secado convencional de la madera de *Vochysia guatemalensis* Donn Sm. (cebo/mayo)

Alta variación del contenido de humedad final de la madera luego del secado.

Se presentan las siguientes causas como origen de la variación en el CHF:

a. Posición de la tabla respecto a la posición de la médula: las tablas cerca de la médula son de más rápido secado que las tablas cerca de la corteza, por lo que las tablas próximas a la médula resultarán con menor CHF después del secado que las tablas cerca de la corteza.

b. Las tablas con un alto porcentaje de madera de duramen terminan con un CHF mayor que las tablas con madera de albura.

c. La madera de cebo es propensa a producir bolvas de humedad en la madera seca (Figura 4). Las bolvas presentan CHF que pueden variar entre 12 y 35% y se desarrollan casi exclusivamente en tablas con corte radial (Figura 3k, 3c y 3d).



d. Las tablas que contengan madera con corte radial (Figura 3b, 3c y 3d) son de más lento secado que las tablas con corte tangencial.

Recomendaciones para mejorar la calidad del secado de la madera de cebo.

Con el fin de mejorar o disminuir la variabilidad del CHF y los defectos de secado en el secado de la madera, se dan las siguientes recomendaciones:

1. Separar las troncos de las partes altas de las partes bajas del árbol y separar la madera en dos lotes para secar: uno con madera de la parte inferior del árbol y el otro de la parte superior del árbol. Luego cada lote se debe secar por separado.
2. Separar la madera de albura de la madera con presencia de duramen.
3. Separar la madera con corte tangencial de la madera de tipo radial, para secar estas en procesos diferentes. En el caso de secar estos dos tipos en un mismo lote se debe colocar las sondas de control en la madera con corte radial.

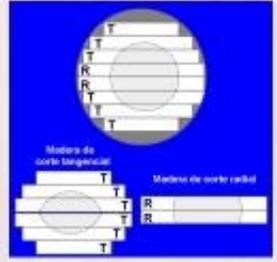


Figura 5. Separación de madera por tipo de corte (tangencial o radial).

4. Utilizar programas de secado en donde se empleen altas humedades relativas al inicio del secado, y temperaturas medias, como el programa de secado mostrado en el cuadro 2 y de preferencia el denominado secado lento.

5. Colocar los pines de control en la región de madera radial. Separación de madera por tipo de corte (tangencial o radial).



Figura 6. Colocación de la sonda de control de contenido de humedad. Observe que en la tabla presente madera radial y tangencial, la sonda fue colocada en la parte de madera radial.

Información recopilada por: Roger Moya, Carolina Tenorio y Diana Aguilar
Fotografías: Roger Moya
Edición: 0002-2530-2013 Fax: 0050-2280-1111
Año: 2013

GUÍA PRÁCTICA N° 4

ALGUNOS ASPECTOS A CONSIDERAR PARA EL SECADO CONVENCIONAL DE LA MADERA DE CEBO (*Vochysia guatemalensis*)



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INTEGRACIÓN BOSQUE-INDUSTRIA



Introducción

La especie cebo es de gran aceptación en los programas de reforestación comercial en Costa Rica, debido a que es una especie de rápido crecimiento, de fácil adaptación en suelos degradados, pionera en la recuperación de bosques y con gran potencial de aprovechamiento. Sin embargo, en las primeras experiencias de industrialización de la madera proveniente de plantaciones se han encontrado severos problemas en la calidad de la madera aserrada seca, siendo entre ellos, la falta de uniformidad del contenido de humedad final (CHF), y la alta incidencia de defectos de secado como torceduras, rajaduras, grietas y colapsos en la madera.



Figura 1. Aserrado en madera seca al horno, selección según sea su presencia o ausencia aserrada de 1) un día seco, y presencia de rajaduras y grietas asociadas a cambios en humedad seca proveniente de árboles de rápida crecimiento de 2) postmuestreo

Alto contenido de humedad inicial

La madera de cebo presenta un alto contenido de humedad inicial (CHI), en promedio de 156%, y una alta variabilidad de este CHI (Cuadro 1). La procedencia de la madera tiene efectos en el valor de CHI, por lo general la madera de árboles que crecen en sitios con clima seco, como la región de Pacífico Norte y Pacífico Central de Costa Rica, producen madera con un CHI mayor, aproximadamente 15% más, que la madera proveniente de árboles de plantaciones con clima húmedo. Ambas regiones presentan alta variabilidad (cuadro 1).

Variación del contenido de humedad inicial con la altura del árbol y en sitios de plantación

Se tiene el inconveniente que la madera proveniente de las partes altas del árbol presentan un CHI superior a la madera de las partes bajas de los árboles (Figura 2a). Con relación a la variación en sentido medula-corteza, cuando la traza está compuesta de sólo madera de albura se tiene la ventaja que el CHI es relativamente uniforme o de poca variación, cuando en una misma tabla se presenta madera de albura y madera de duramen se producen variaciones de humedad entre los dos tipos de madera. Se ha encontrado que el CHI de la madera aumenta al incrementar el porcentaje de madera de duramen en la sección transversal (Figura 2b). Esto trae el inconveniente de que, en un mismo tablo con madera albura y duramen, la parte que contiene albura se seca más rápido que aquella parte de la tabla que contiene madera duramen.

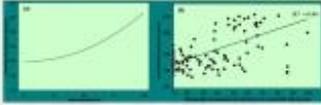


Figura 2. Variación del contenido de humedad inicial de la madera en diferentes alturas del árbol (a) y porcentaje de presencia de madera de duramen en sección transversal.

Selección del programa de secado a utilizar

Se han experimentado dos programas de secado: (1) denominado de secado rápido, comúnmente utilizado en la madera proveniente de bosque natural y (2) denominado de secado lento, el cual se diferencia del programa anterior porque se utiliza un contenido de humedad de equilibrio alto dentro de la cámara al inicio del secado (Cuadro 2). Al utilizar el programa de secado rápido, se tiene la ventaja de que la cantidad de días para secar la madera es 30% menor que la cantidad de días del programa de secado lento. Sin embargo se tiene el inconveniente de que se produce una alta variación del CHI, se desmenuza de bolsas de humedad (Figura 4) y se obtienen una mayor presencia de defectos de secado.

Selección de la procedencia de un árbol entre la madera con corte radial y madera con corte tangencial

En el aserrío de trazas de plantación se producen 4 tipos de tablas: madera exclusivamente tangencial (Figura 3a), tablas exclusivamente radial (Figura 3b), tablas combinado tangencial-radial (Figura 3c) y tablas con una composición radial-tangencial-radial (Figura 3d). Se ha encontrado que cada tipo de tabla presenta diferentes velocidades de secado, siendo la madera de corte tangencial de más rápido secado que la madera de corte radial. Durante el secado de las tablas que contienen los dos tipos de corte (patrón radial-tangencial en figura 3c y patrón radial-tangencial-radial en figura 3d) la parte de la tabla con corte tangencial se secará más rápido que la parte de la tabla con corte radial. Esto provoca una diferencia en el CHI en una misma tabla.

Diferencia entre programas de secado

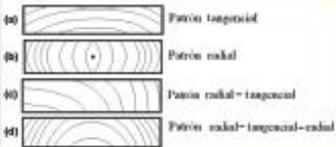


Figura 3. Diferencia entre programas de secado en una pieza de madera. (a) corte exclusivamente tangencial (b) corte exclusivamente radial, (c) madera con dos tipos radial-tangencial y (d) madera con 3 tipos de corte radial-tangencial-radial

Cuadro 1. Composición de humedad inicial promedio y su variación para la madera de cebo de árboles de plantaciones forestales.

Condición	Promedio de la humedad inicial (%)	Variancia de la humedad inicial (%)
Plantación pionera	159	De 8% a 241%
Madera seca al horno	151	De 30% a 276%
Plantación Zona Sur	148	De 90% a 214%

Cuadro 2. Diferencia programas de secado utilizados en el estudio experimental de 7 generaciones.

Especie de madera	Secado rápido*			Secado lento*		
	Tiempo (h)	CHI (%)	CV (%)	Tiempo (h)	CHI (%)	CV (%)
Colobocarpus	37	14,5	37	10,0	-	-
Secado	38	14,1	30	17,0	50	-
	38	13,9	45	30	13,0	45
	41	18,3	30	44	11,0	33
	44	7,6	30	44	9,0	33
	49	5,3	25	49	7,0	25
	53	4,0	30	53	5,0	20
	66	3,3	15	66	3,2	15
Eucalyptus	66	3,3	17	66	3,2	17
	66	3,3	11	66	3,2	11
	66	3,5	-	66	3,5	-
Dalmanella	38	3,5	-	30	3,5	-

*Programa propuesto por Ríos et al. (1988).
 Legenda: TI=Tiempo total de horno seco; CHI: contenido de humedad de equilibrio; CV: Coeficiente de variación de la humedad.