

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**Efectos del intemperismo en el color y calidad de superficie de la
madera de *Acacia mangium*, *Cedrela odorata* y *Tectona grandis*
con tres acabados**

Tesis para optar por el título de Ingeniero Forestal Grado Licenciatura

JUAN CARLOS VALVERDE OTÁROLA

CARTAGO, COSTA RICA

2011



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**Efectos del intemperismo en el color y calidad de superficie de la
madera de *Acacia mangium*, *Cedrela odorata* y *Tectona grandis*
con tres acabados**

Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal

JUAN CARLOS VALVERDE OTÁROLA

CARTAGO, COSTA RICA

2011

Efectos del intemperismo en el color y calidad de superficie de la madera de *Acacia mangium*, *Cedrela odorata* y *Tectona grandis* con tres acabados

Juan Carlos Valverde Otárola*

Resumen

El uso de la madera en exteriores se ve limitada por los procesos de fotodegradación del color, para prevenir este fenómeno se han desarrollado una gran gama de acabados, además, de la creación de equipos que recrear el intemperismo en un periodo de tiempo menor. En este estudio se evaluó el cambio de los parámetros de color y el índice de calidad de la superficie con acabados de tipo poliuretano y barniz en madera de *Acacia mangium*, *Cedrela odorata* y *Tectona grandis*, en dos condiciones de intemperismo: natural (por 350 días) y acelerado (500 horas por especie). Los resultados demostraron que la aplicación de estos acabados generó variaciones en los parámetros de color de la madera antes de ser expuesta a la intemperie, dando como resultado un cambio notable del color. Por otra parte, se encontró que luego de la exposición el cambio de color, medido por ΔE^* fue mayor en el intemperismo natural que el obtenido en intemperismo acelerado. En cuanto al comportamiento de los parámetros de color y el índice de calidad de superficie en el tiempo de exposición, se encontró que el cambio de color aumenta, en especial el acabado tipo barniz, y el índice de calidad de superficie disminuye. Finalmente se encontraron modelos capaces de predecir los cambios de color y en la calidad de superficie en intemperismo natural a partir de los datos de cambio de color u calidad y tiempo en intemperismo acelerado.

Palabras Claves: fotodegradación, intemperismo, decoloración, maderas tropicales.

* Valverde, JC. 2011. Efectos del intemperismo en el color y calidad de superficie de la madera de *Acacia mangium*, *Cedrela odorata* y *Tectona grandis* con tres acabados. Tesis de Licenciatura. Cartago, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 60p.

Abstract

The use of exterior wood is limited by the photodegradation of color processes. To prevent this phenomenon a wide range of coatings has been developed including the creation of weathering equipment to create it in a shorter period of time. In this study, we evaluated the color parameters change and the index of the surface quality in *Acacia mangium*, *Tectona grandis* and *Cedrela odorata* with polyurethane and wood varnish in two weathering conditions: natural (for 350 days) and accelerated (500 hours per species). The results showed that application of these coatings generated variations in the parameters color of the wood parameters before being exposed to the elements, resulting in a noticeable change of color. Moreover, we found that after the color exposure change as measured by ΔE^* was higher in the natural weathering that obtained in accelerated weathering. On the behavior of the parameters of color and surface quality index at the time of exposure, we found that the color change increases, especially varnish-like coating, and surface quality index decreases. Models were finally able to predict changes in color and surface quality of natural weathering from ΔE^* or quality and accelerated weathering time.

Keywords: photodegradation, weathering, discoloration, tropical timber.

Acreditación

Esta tesis fue aceptada por el Tribunal evaluador de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica y aprobada por el mismo como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura.

Efectos del intemperismo en el color y calidad de superficie de la madera de *Acacia mangium*, *Cedrela odorata* y *Tectona grandis* con dos acabados

Miembros del Tribunal Evaluador

Róger Moya Roque, Ph.D.

Director de Tesis

Cynthia Salas Garita. MSc.

Lectora

Rafael Córdoba Foglia. Ing

Lector

Juan Carlos Valverde Otárola

Estudiante

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado con mucho cariño a mi familia, la cual me ha apoyado y confiado en mí durante toda mi formación académica y sin los cuales nada hubiera sido posible. Al igual de todas las personas que han creído en mí y me han dado su apoyo incondicional.

Agradecimientos

Gracias a la vida por permitirme haber culminado este ciclo de cinco años en los cuales he aprendido y conocido un sin fin de cosas que han abierto mi mente; primeramente quiero agradecer a mis padres, sin los cuales no hubiera podido afrontar todos los retos que se dieron y siempre tuve su apoyo y confianza. Igualmente quiero agradecerle a Roger Moya por su apoyo en este proyecto y sus consejos para desarrollarlo de la mejor calidad posible. A Cynthia Salas por su gran apoyo, confianza y consejos que fueron de gran utilidad y a Rafael Córdoba por sus importantes aportes en la producción de este documento.

Quiero agradecer por su apoyo incondicional, sus consejos y compañías en los momentos que más necesite son mis amigos (as): Monzerrath Rivera, Esaú Chávez, Lorena Gómez, María Rodríguez, Elsa Brenes y Karla Salas; los cuales fueron un soporte e inspiración para hacer el mejor trabajo posible. Además, quiero dar un agradecimiento especial a Myriam Galvani, Mayela Gúzman y Diego Camacho por la confianza depositada, todos sus buenos deseos y esperanzas sembradas en mí y en este trabajo.

Finalmente quiero agradecer a todas las personas que puntualmente no mencioné pero que estuvieron presentes en el año y medio que duró este proyecto y que en diferentes etapas mostraron diferentes muestras de apoyo, las cuales fueron importantes para mí y las tengo guardadas en mi corazón y para todos ellos les dedico esta frase:

"Los grandes espíritus siempre han encontrado una violenta oposición de parte de mentes mediocres" (Albert Einstein)

Índice General

Resumen	iii
Abstract	iv
Acreditación	v
Dedicatoria	vi
Agradecimientos	vii
Índice General	viii
Índice de Cuadros	ix
Índice de Figuras	x
Índice de Anexos	x
Introducción	11
Objetivos	13
<i>Objetivo general</i>	13
<i>Objetivos específicos</i>	13
Marco Teórico	14
Materiales y Métodos	17
<i>Descripción del área de estudio</i>	17
<i>Características de la madera utilizada y de los acabados</i>	18
<i>Tipos de intemperismo</i>	19
Intemperismo natural	19
Intemperismo acelerado	20
<i>Mediciones del color</i>	21
<i>El sistema del color CIELab</i>	21
<i>Diferencia del color (ΔE^*)</i>	22
<i>Valoración estética de los acabados</i>	23
<i>Análisis estadísticos y modelación matemática</i>	23
Resultados	26
<i>Cambio del color luego de la exposición al intemperismo natural y acelerado</i>	30

<i>Comparación de la variación de L*, a*, b* y ΔE^* con el tiempo en intemperismo acelerado y natural</i>	31
<i>Acacia mangium</i>	31
<i>Cedrela odorata</i>	33
<i>Tectona grandis</i>	36
<i>Modelación matemática de la variación del color (ΔE^*) y calidad de superficie en intemperismo natural en relación al ΔE^* y calidad de superficie en intemperismo acelerado y el tiempo</i>	41
Discusión	43
<i>Coloración inicial de la madera y efectos de la aplicación de acabados</i>	43
<i>Cambio del color luego la exposición al intemperismo natural y acelerado</i>	44
<i>Apariencia y comportamiento de los acabados</i>	47
<i>Modelación matemática del de la variación del color (ΔE^*) y calidad de superficie en intemperismo natural en relación al ΔE^* y calidad de superficie en intemperismo acelerado y el tiempo</i>	48
Conclusiones	50
Anexos	53
Bibliografía	56

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Acabados utilizados en la superficie de <i>A. mangium</i> , <i>C. odorata</i> y <i>T. grandis</i> en dos tipos de intemperismo.	19
Cuadro 2. Rangos de variaciones del valor del ΔE^* según la clasificación de Cui <i>et al.</i> (2004)	22
Cuadro 3. Valores iniciales de los parámetros L*, a* y b* del color del duramen de <i>Acacia mangium</i> , <i>Cedrela odorata</i> y <i>Tectona grandis</i> con los diferentes acabados utilizados en los dos intemperismos utilizados.	27
Cuadro 4. Valores diferenciales del ΔE^* de las comparaciones del duramen de <i>Acacia mangium</i> , <i>Cedrela odorata</i> y <i>Tectona grandis</i> con los diferentes acabados previos a la exposición al intemperismo natural (diagonal inferior) e intemperismo acelerado (diagonal superior).....	29
Cuadro 5. Coeficientes de linealización del modelo de cambio del color (ΔE^*) e índice de calidad de superficie (ICS) coeficientes de determinación (R^2) y porcentaje de error para los residuos.	42

Índice de Figuras

Figura 1. Condiciones ambientales anuales de la Ciudad de Cartago-Costa Rica	17
Figura 2. Diseño del caballete utilizado para la ubicación de las unidades experimentales de <i>A. mangium</i> , <i>C. odorata</i> y <i>T. grandis</i> , expuestas al intemperismo natural.	20
Figura 3. Valores del ΔE^* obtenidos al exponer el duramen de <i>A. mangium</i> , <i>C. odorata</i> y <i>T. grandis</i> con tres acabados al intemperismo natural y acelerado	30
Figura 4. Variaciones en el tiempo de los parámetros L^* , a^* , b^* y ΔE^* , en duramen de <i>A. mangium</i> con tres acabados expuestos al intemperismo natural y acelerado.....	33
Figura 5. Variaciones en el tiempo de los parámetros L^* , a^* , b^* y ΔE^* , en duramen de <i>C. odorata</i> con tres acabados expuestos al intemperismo natural y acelerado.....	35
Figura 6. Variaciones en el tiempo de los parámetros L^* , a^* , b^* y ΔE^* , en duramen de <i>T. grandis</i> con tres acabados expuestos al intemperismo natural y acelerado	38
Figura 7. Comportamiento en el tiempo del Índice de calidad de superficie en duramen de <i>A. mangium</i> , <i>C. odorata</i> y <i>T. grandis</i> con tres acabados expuestos al intemperismo natural y acelerado.....	40

Índice de Anexos

Anexo 1. Modelo tridimensional del ΔE^* en intemperismo natural a partir del ΔE^* en intemperismo acelerado y tiempo en horas para el duramen de <i>A. mangium</i> con tres acabados.....	53
Anexo 2. Modelo tridimensional del ΔE^* en intemperismo natural a partir del ΔE^* en intemperismo acelerado y tiempo en horas para el duramen de <i>C. odorata</i> con tres acabados.....	53
Anexo 3. Modelo tridimensional del ΔE^* en intemperismo natural a partir del ΔE^* en intemperismo acelerado y tiempo en horas para el duramen de <i>T. grandis</i> con tres acabados.....	54
Anexo 4. Modelo tridimensional del Índice de calidad de superficie natural a partir del Índice de calidad de superficie en intemperismo acelerado y tiempo en horas para el duramen de <i>A. mangium</i> con tres acabados.....	54
Anexo 5. Modelo tridimensional del Índice de calidad de superficie natural a partir del Índice de calidad de superficie en intemperismo acelerado y tiempo en horas para el duramen de <i>C. odorata</i> con tres acabados.....	55
Anexo 6. Modelo tridimensional del Índice de calidad de superficie natural a partir del Índice de calidad de superficie en intemperismo acelerado y tiempo en horas para el duramen de <i>T. grandis</i> con tres acabados.....	55

Introducción

La madera es un material que posee una cualidad única en comparación con otros materiales y es su belleza estética natural (Nishinko *et al.* 1998, Mononen *et al.* 2002, Cui *et al.* 2004), la cual varía con la especie, las características genéticas y ambientales en las que se desarrolla el árbol (Schmidt 2006, Oltean *et al.* 2008, Sotelo-Montes *et al.* 2008, Bradbury *et al.* 2011). Sus propiedades físico-mecánicas, permiten a dicho material ser utilizado en construcciones de todo tipo, en inmobiliarios e inclusive en la confección de artículos de lujo (Surmiński 2007, Kolb 2008).

Sin embargo, en la actualidad se ha dado un desuso de la madera en la construcción debido a múltiples factores entre los cuales se destaca la pérdida de su color natural (William *et al.* 1999, Kolb 2008). Este fenómeno se da de manera rápida cuando la madera es expuesta a la intemperie. Con el tiempo va perdiendo su color original llegando a obtener una coloración grisácea, la cual es estéticamente mal percibida (Hiltunen *et al.* 2008, Evans *et al.* 2008, Deka *et al.* 2009).

El desarrollo de acabados tienen el objetivo de preservar las propiedades de la madera y evitar que se dé degradación del color, aumentar el tiempo de vida y por ende el atractivo visual (Creemers *et al.* 2002), para lo cual se ha desarrollado una gran cantidad de productos químicos que pretenden evitar el proceso de fotodegradación (George *et al.* 2005), y tomando en consideración las legislaciones establecidas en contaminación ambiental y salud para las personas que lo aplican (Loferski 1999, Lambourne y Strivens 2004, Bulian y Graystone 2009).

Igualmente se han desarrollado equipos especializados como las cámaras de intemperismo, que pretenden evaluar en periodos cortos de tiempo la efectividad y resistencia de los acabados para exteriores (Tolvaj y Mitsui 2005, Evans *et al.* 2008, Ahajji *et al.* 2009).

En el caso de Costa Rica, la madera de las especies: *Acacia mangium*, *Cedrela odorata* y *Tectona grandis* son muy cotizadas en el mercado nacional e internacional (Salazar y Salas 2010), pero se desconoce su comportamiento ante el intemperismo y el efecto que tiene en cada una de ellas la utilización de acabados (en este caso: poliuretano y barniz) que eviten o retarden el proceso de degradación.

Por esta razón, generar tendencias de comportamiento en la decoloración y calidad de los acabados de estas especies y desarrollar modelos matemáticos que permitan explicar el proceso de la degradación del color, (en ambos intemperismos) permitirá un uso más adecuado para cada especie del acabado y por otro una ganancia en las condiciones estéticas del material.

Objetivos

Objetivo general

Analizar los efectos del intemperismo en los parámetros de color y la calidad de la superficie en madera de *Acacia mangium*, *Cedrela odorata* y *Tectona grandis* con dos acabados.

Objetivos específicos

- i. Evaluar en madera de tres especies forestales el comportamiento de los parámetros L^* (luminosidad), a^* (tendencia de rojo a verde), b^* (tendencia de amarillo a azul); ante el intemperismo natural y acelerado con tres acabados.
- ii. Analizar en tres especies forestales el cambio del color con el ΔE^* (variación neta del color en un periodo de tiempo) por efecto del intemperismo en madera con dos acabados en comparación con madera en estado natural.
- iii. Establecer en tres especies forestales el comportamiento de la calidad de la superficie expuesta al intemperismo natural y acelerado con los tres acabados evaluados.
- iv. Generar modelos matemáticos que relacionen el ΔE^* y la calidad de superficie generados en intemperismo natural a partir del ΔE^* y la calidad de superficie dados en intemperismo acelerado en el tiempo.

Marco Teórico

La madera ha sido un material muy utilizado por el ser humano durante miles de años en usos como la construcción, muebles, artículos de lujo, entre otros (Kolb 2008); esto debido a su durabilidad natural, su facilidad y versatilidad para ser trabajado (Schaller y Rogez 2007, Surmiński 2007). Además, uno de los aspectos físicos que ha destacado a la madera es su color natural, el cual estéticamente es muy atractivo y ha sido uno de los elementos más relevantes para darle a la madera una elegancia en las edificaciones u otras aplicaciones (Surmiński 2007, Kolb 2008).

Varios estudios han determinado que el color de la madera varía según la especie (Mononen *et al.* 2002, Cui *et al.* 2004), las características genéticas (Sotelo-Montes *et al.* 2008, Bradbury *et al.* 2011a; Bradbury *et al.* 2011b) y ambientales relacionadas con el sitio en el que se encuentra el árbol (Creemers *et al.* 2002, Schmidt 2006, Oltean *et al.* 2008). Un estudio desarrollado por Lukmandaru *et al.* (2009) a nivel de color en *Tectona grandis*, determinó que el color de la madera se ve influenciada aparte de la lignina y celulosa por extractivos específicos, entre los cuales se destacan: tectoquinona, 2-hidroximetil antraquinona y tectol; los cuales le dan la coloración amarillenta y líneas negras en el duramen de la madera de esta especie. Miranda *et al.* (2011) determinaron que la cantidad de estos extractivos varían con la edad del individuo y las características del suelo (en especial la acidez). En el caso de las especies *Acacia mangium* y *Cedrela odorata* no se han desarrollado estudios químicos para determinar si hay extraíbles específicos o características de ambiente que generen una variación del color, pero se sugiere, de manera general, que la presencia de rafidios, ceras y aminas son las que generan las variaciones básicas en el color de la madera de cada una de estas especies (George *et al.* 2005).

Sin embargo, una de las mayores limitaciones que presenta la madera es la susceptibilidad a la pérdida de su color natural con el paso del tiempo; en especial cuando es expuesta a la intemperie (Creemers *et al.* 2002, Tolvaj y Mitsui 2005, Schmidt 2006, Dawson *et al.* 2008, Schnabel *et al.* 2009). Factores como la radiación solar, la temperatura, la lluvia, el viento, la humedad relativa, la temperatura, la contaminación, entre otros; aceleran el deterioro del color (Schaller y Rogez 2007, Deka *et al.* 2008).

Estudios como los de Cui *et al.* (2004); Petric *et al.* (2004); George *et al.* (2005) Tolvaj y Mitsui (2005); Dawson *et al.* (2008); Deka *et al.* (2008); Oltean *et al.* (2008); Ahajji *et al.* (2009) con especies de climas templados y utilizando intemperismo acelerado; han encontrado que la luz ultravioleta (UV), la luz visible y la infrarroja son las que generan las mayores reacciones químicas en las paredes celulares que componen la madera; estas luces generan despolimerización de la lignina y la celulosa, dos de los elementos celulares que presentan compuestos químicos que le dan el color a la madera. En el caso de la lignina se ha determinado que absorbe de 85 a 90 % de la luz UV (Sudiyani *et al.* 1999, George *et al.* 2005, Deka *et al.* 2008, Ncube y Meincken 2010), provocando una disminución de los grupos metoxilos y un aumento de la formación de grupos carbonilos y de cromofórmicos de carboxilo, que son los principales compuestos orgánicos que producen cambios del color en la madera (George *et al.* 2005, Deka *et al.* 2008).

Otros elementos ambientales como el agua y el viento aceleran los procesos de degradación y erosión de la madera y por ende la pérdida del color; el ingreso de agua en la madera genera rajaduras y formación de grupos de fenoxilo, los cuales aceleran los procesos de fotodegradación (de Meijer 2001, Tolvaj y Mitsui 2005, Evans *et al.* 2008, Ahajji *et al.* 2009, de Meijer y Nienhuis, 2009, Saha *et al.* 2010).

Para disminuir o evitar los procesos de deterioro por el intemperismo se han desarrollado una gran gama de productos químicos (acabados) para aplicar en la superficie de la madera (Petric *et al.* 2004, Hiltunen *et al.* 2008, Deka *et al.* 2009); además, se han creado equipos que pretenden reproducir el efecto del intemperismo natural en periodos menores de tiempo (cámaras de intemperismo acelerado) y con ello evaluar la calidad de un acabado en un periodo de tiempo menor y con un grado de confiabilidad elevado (Tolvaj y Mitsui 2005). Todas estas técnicas se han desarrollado con el fin de aumentar el tiempo de vida de la madera (específicamente el color) y mejorar la calidad y efectividad de los acabados (Schaller y Rogez 2007).

Entre los acabados que más se han desarrollado para exteriores están los barnices, los cuales se caracterizan por tener aceites y resinas (en su mayoría inorgánicas) como compuestos activos, que tienen la función de cubrir y aislar la superficie de los diferentes tipos de luces y el agua que las impactan; además, de evitar de la mejor manera una variación del color natural al sobreponer capas incoloras (Lambourne y Strivens 2004, Williams 2005, Bulian y Graystone 2009). En caso de los acabados de tipo poliuretano para exteriores, la línea de acabados se caracteriza por la utilización de compuestos orgánicos que tienen como elemento activo el prepolímero de uretano el cual es insoluble en agua y refractante de la luz UV, aislando la madera de los efectos del intemperismo (Lambourne y Strivens 2004, Williams 2005, Bulian y Graystone 2009).

Entre los estudios encontrados se destaca el uso del intemperismo acelerado en especies de zonas templadas. Entre las especies más investigadas en degradación del color se encuentran: *Betula pendulata* (Oltean *et al.* 2008), *Cryptomeria japonica* (Kataoka *et al.* 2004, Tovaj y Mitsui 2005), *Castanea sativa* (Sivrikaya *et al.* 2010), *Picea albies* (Petric *et al.* 2004, Deka *et al.* 2008, Oltean *et al.* 2008, Ahajji *et al.* 2009), *Quercus petrae* (Sivrikaya *et al.* 2010), entre otras. Para el caso de especies tropicales son muy limitados los estudios desarrollados, entre los cuales se destacan los de Oliveira *et al.* (2007) y Barreto y Pastorez (2009) con especies sudamericanas. Específicamente con las especies utilizadas para este estudio y con los acabados utilizados únicamente se encontraron los estudios de Valverde (2009); Valverde y Moya (2010) con las especie *C. odorata* en combinación con un acabado poliuretano; con las especies *A. mangium* y *T. grandis* no se han encontrado estudios de este tipo.

En el presente estudio se utilizó las especies *A. mangium* y *T. grandis* debido a que en la actualidad son de las especies que en el sector costarricense se encuentran en la mayoría de los proyectos de reforestación y *C. odorata* por ser una de las especies nativas más aprovechadas; cuyos precios de venta en el mercado son muy buenos (Salazar y Salas 2010), por esta razón su correcta utilización conociendo la problemática del intemperismo y la utilización correcta de un acabado permite una optimización del recurso y una mayor tiempo de vida de la madera en un uso específico.

Materiales y Métodos

Descripción del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el Centro de Investigación e Integración Bosque Industria (CIIBI) del Instituto Tecnológico de Costa Rica, ubicado en Cartago, Costa Rica ($9^{\circ}50'58,47''N$; $83^{\circ}54'36,86''W$). El sitio se encuentra a una altitud de 1380 msnm, con una temperatura anual promedio entre los 14,99 a los 23,83 °C y una precipitación media anual de 1563,5 mm (IMN 2011). La variación de las condiciones ambientales anuales se detallan en la Figura 1, donde se destacan dos picos de precipitación que se dan durante los meses de Mayo a Junio y de Septiembre a Octubre producto del paso de la Zona de Convergencia Intertropical sobre el país y a su vez variaciones en el contenido de humedad de la madera, la cual tiende a aumentar a partir de Marzo a Diciembre y posterior a ello disminuye.

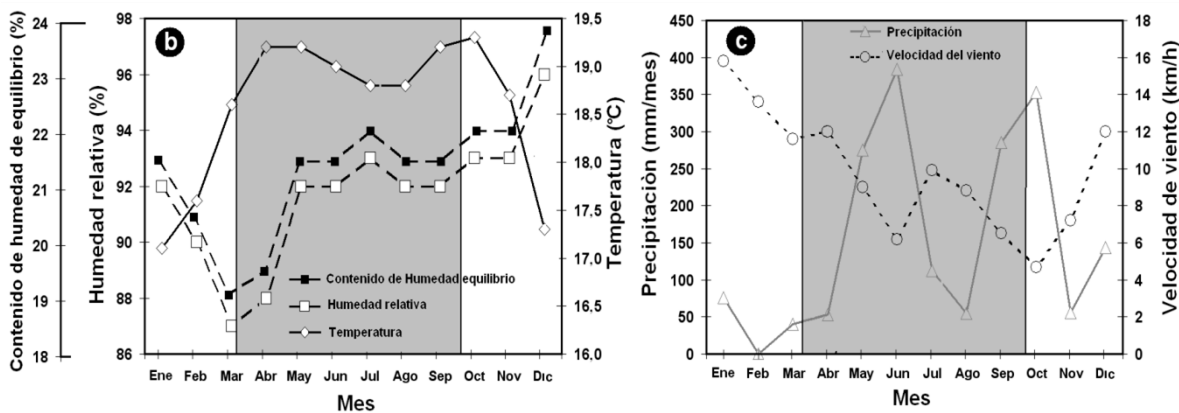


Figura 1. Condiciones ambientales anuales de la Ciudad de Cartago-Costa Rica (en los últimos 20 años). **Fuente:** Estación Meteorológica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Características de la madera utilizada y de los acabados

Se utilizó madera de *C. odorata* proveniente bosque natural de la Zona pacífico central, *A. mangium* y *T. grandis* provenientes de plantaciones forestales en la Zona norte. Para cada tipo de intemperismo se utilizaron doce tablas de madera por cada especie (seis de corte tangencial y seis de corte radial), la madera utilizada reportó un contenido de humedad entre 12–14 %. De cada una de las tablas, se obtuvieron seis probetas (tres con dimensiones de 7,5 cm de ancho; 20,0 cm de largo y 20,1 mm de espesor y otras tres de 7,5 cm de ancho; 15,3 cm de largo y 20,1 mm de espesor). Todas las muestras utilizadas estaban libres de defectos o daños y corresponden con duramen. Las probetas fueron acondicionadas a un contenido de humedad de equilibrio del 12 % (a una temperatura constante de 22 °C y una humedad relativa del 67 %). El grupo de probetas que alcanzaron el equilibrio de humedad se dividieron en dos grupos: probetas que se utilizaron en el intemperismo natural y probetas que se utilizaron en el intemperismo acelerado) y a su vez cada grupo se subdividieron en tres para la aplicación de cada acabado.

Una vez que se seleccionó las piezas, éstas fueron pulidas con lija #80 y posteriormente lija #120, luego se procedió a la aplicación del acabado (Cuadro 1).

Cuadro 1. Acabados utilizados en la superficie de *A. mangium*, *C. odorata* y *T. grandis* en dos tipos de intemperismo.

Tipo Acabado	Descripción
Natural (testigo)	La superficie se dejó en natural (en caso de las piezas que se utilizaron en la cámara de intemperismo se les aplicó una capa de poliuretano alrededor de la pieza, exceptuando la cara principal).
Barniz	La base de este producto es resinas y aceites. Este producto no fue necesario diluir en solvente ya que el producto comercial viene preparado para aplicarse, simplemente se agitó y se aplicó con una brocha de dos pulgadas. En total se aplicó una película de 90 µm de espesor promedio. La aplicación se efectuó acorde con la recomendación de la hoja técnica del producto.
Poliuretano	Consistió en un sellador y un acabado final de prepolímero de uretano, en este caso fue sin brillo (mate). En total se aplicó una película de 104 µm de espesor promedio. La aplicación del acabado se realizó con una pistola de tipo HVLP (High Volume Low Pressure) y una presión de tres bares.

Tipos de intemperismo

En el estudio se utilizaron dos tipos de intemperismo, a continuación se caracteriza cada uno de ellos:

Intemperismo natural

Exposición al aire libre en un área donde no hubiera sombra durante todo el día y que la lluvia, sol y viento pudiera afectar en su totalidad las unidades experimentales.

Las unidades experimentales fueron colocadas en caballetes con un ángulo de inclinación de 45° (Figura 2). Los caballetes se ubicaron orientadas hacia el Norte. El tiempo de exposición fue de 350 días.



Figura 2. Diseño del caballete utilizado para la ubicación de las unidades experimentales de *A. mangium*, *C. odorata* y *T. grandis*, expuestas al intemperismo natural.

Intemperismo acelerado

Para esta prueba se utilizó una cámara de ensayo de intemperismo acelerado, marca Q-Lab (modelo QUV/spray); la cual se tomó en cuenta lo establecido por la norma ASTM G-154 (ASTM 2005c). Se desarrollaron mini ciclos de cinco horas con dos fases: una primera de tres horas de radiación ultravioleta a 60 °C y con una radiación de 0,63 w/m², posterior a ello una segunda fase de condensación la cual duró dos horas y consistió en utilizar agua evaporada a una temperatura de 50 °C. Durante los periodos de 0 a 50 horas y de 300 a 350 horas, se agregó una tercera fase de spray a temperatura ambiente que duró 15 minutos, la aplicación de esta fase fue para generar un mayor nivel de estrés en los acabados y relacionar esto con las variaciones climáticas de las probetas expuestas al intemperismo natural y los dos picos de precipitación del año. El tiempo de exposición en la cámara fue de 500 horas en total para cada especie.

Mediciones del color

Cada probeta que se utilizó en estos ensayos fueron medida en tres puntos diferentes, dos de las mediciones se hicieron a dos centímetros de los extremos y una tercera en el centro de las piezas. El color de la madera fue medido en la superficie de la muestra a temperatura ambiente. Para lo cual se utilizó un espectrofotómetro marca miniSkan XE Plus de HunterLab. Se usó el sistema cromatológico estandarizado CIELab. El rango de esta medida es de 400 a 700 nm, con una apertura en el punto de medición de 11 mm. Para la observación de la reflexión se incluyó 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).

Las mediciones del color en el intemperismo natural se desarrolló en tres fases, una primera en la cual se tomaron datos cada siete días hasta contabilizar 98 días; una segunda fase donde se recolectaron datos cada 15 días (hasta llegar a 203 días) y finalmente una tercera fase en la que se hicieron mediciones cada 29 días, hasta completar 350 días. En caso de las pruebas con intemperismo acelerado, se hicieron mediciones cada 50 horas hasta cumplir las 500 horas de la prueba para cada especie.

El sistema del color CIELab

El miniSkan XE Plus generó por cada medición tres parámetros que fueron: L*, a* y b*; los cuales están estandarizados por la CIE (Comisión internacional de l'Éclairage) y en la norma ASTM D-2244 (ASTM 2005b); las cuales definen a L* como la luminosidad (la cual va de 0 al 100, donde 0 es negro y 100 es blanco); a* como la tendencia del color de rojo a verde (es una escala infinita, donde los datos positivos de a* tiende a colores rojizos; datos negativos tiende a colores verduzcos) y finalmente b* (es una escala también infinita, donde los valores positivos de b* indican una tendencia amarillenta y datos negativos de b* una tendencia azulada).

Diferencia del color (ΔE^*)

Fue determinada por la variación neta del color para cada acabado en un periodo de tiempo acorde con la norma ASTM D 2244 (ASTM 2005b) cuya fórmula es detallada en la Ecuación 1. La diferencia de color fue determinado para: (i) la diferencia de color entre cada tipo de acabado aplicado al inicio de la prueba de intemperismo, (ii) la diferencia de color entre diferentes especies y tipo de acabado y (iii) finalmente la diferencia de color para cada tipo de acabado en cada especie en los diferentes tipos de exposición. Posteriormente los valores de ΔE^* , fueron clasificados acorde a la clasificación de Cui *et al.* (2004) para definir el grado de variación del color en las diferentes especies e intemperismos aplicados.

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (1)$$

Donde:

$$\Delta L = L^*_{\text{antes del intemperismo}} - L^*_{\text{después de intemperismo}}$$

$$\Delta a = a^*_{\text{antes del intemperismo}} - a^*_{\text{después de intemperismo}}$$

$$\Delta b = b^*_{\text{antes del intemperismo}} - b^*_{\text{después de intemperismo}}$$

Acorde con la clasificación de Cui *et al.* (2004), que estableció cinco niveles de cambios del color percibidos por el ojo humano los cuales se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Rangos de variaciones del valor del ΔE^* según la clasificación de Cui *et al.* (2004)

Rango de variación	Tipo de cambio
$0 < \Delta E^* > 0,5$	no es apreciable al ojo humano
$1,5 < \Delta E^* > 3,0$	apenas apreciable al ojo humano
$3,0 < \Delta E^* > 6,0$	apreciable al ojo humano
$6,0 < \Delta E^* > 12,0$	color es muy notable al ojo humano
$\Delta E^* < 12$	cambio de color total

Valoración estética de los acabados

En la evaluación de la calidad del acabado en cada especie y su comportamiento al intemperismo (tanto natural como acelerado), se utilizó la norma ASTM D-660 (ASTM 2005a), la cual establece un sistema de evaluación de diferentes deterioros que se pueden dar en una pintura o acabado (en este caso); presenta una escala par del 8 al 2, la cual conforme al número se acerque al 2 el deterioro del acabado es mayor. Entre los tipos de deterioro que se evaluaron fueron: irregular, línea larga, paralelas cortas y mosaicos.

Análisis estadísticos y modelación matemática

El color fue obtenido para cada especie antes de iniciar la exposición al intemperismo, para lo cual se generaron los datos promedio de los parámetros de color (L^* , a^* y b^*). Se realizó un análisis de varianza de dos factores (2-way-Anova) para cada parámetro de color y sobre la diferencia de color (ΔE^*) un análisis varianza de dos factores (2-way-Anova): para la especie y el tipo de intemperismo aplicado y la diferencia entre medias fue aplicado la prueba de Tukey con un nivel de significancia de $P < 0,05$.

El segundo análisis realizado fue un análisis de regresión entre los parámetros de color (L^* , a^* y b^*) y ΔE^* en relación con el tiempo de exposición (para poder comparar directamente las tendencias en el tiempo entre ambos intemperismo el tiempo en intemperismo acelerado se multiplicó por 1,43 para defractorlos en tiempo de intemperismo natural). El modelo aplicó una relación polinómica (Ecuación 2). Se escogió este modelo porque fue el que brindó el coeficiente de determinación más alto (R^2).

$$Y = x_1 * t^3 + x_2 * t^2 + x_3 * t + x_4 \quad (2)$$

Donde:

Y : parámetro de color o valor de ΔE^*

t : tiempo de exposición, en días para el intemperismo natural y en horas para el intemperismo acelerado

x_1, x_2, x_3, x_4 : coeficientes específicos de cada modelo

En cuanto a la valoración de la calidad de los acabados se desarrolló un Índice de Calidad de la superficie (ICS), en el cual se pondera los 4 tipos de defectos evaluados bajo la norma ASTM D-660 (ASTM 2005a), específicamente los defectos de irregularidad, línea larga, paralelas cortas y mosaicos (Ecuación 3). En la ponderación fue considerada la importancia de aparición de los defectos, siendo el defecto de mayor ponderación el de superficie irregular, luego los defectos de línea larga y líneas paralelas cortas y finalmente la de menor ponderación la superficie tipo mosaico (Ecuación 3). Seguidamente se evaluó el comportamiento del ICS con el tiempo de exposición, en intemperismo natural e intemperismo acelerado, utilizando la ecuación 2.

$$ICS = ((IR * 0,50) + (LL * 0,25) + (SP * 0,25) + (MS * 0,10))/10 \quad (3)$$

Donde:

IR: defecto tipo Irregular

LL: defecto de tipo Línea Larga

SP defecto de tipo Paralelas Cortas

MS: defecto de tipo Mosaico.

x_1, x_2, x_3, x_4 : coeficientes específicos de cada modelo

Finalmente se desarrolló un modelo matemático para definir el nivel del cambio del color (ΔE^*) posible en intemperismo natural a partir de los datos generados del ΔE^* en intemperismo acelerado y tiempo (horas) de exposición en la cámara UV. El modelo aplicado para esto es detallado en la Ecuación 4 y fue seleccionado este modelo por que fue el que presentó el coeficiente de determinación (R^2) más alto.

$$\Delta E_{IN}^* = x_1 + (x_2 / \Delta E_{IA}^*) + x_3 * t + x_4 * (t)^2 + x_5 * (t)^3 \quad (4)$$

Donde:

ΔE_{IN}^* = Valor del ΔE^* en intemperismo natural

ΔE_{IA}^* = Valor del ΔE^* en intemperismo acelerado

t = tiempo in horas

En cuanto al índice de calidad de Superficie (ICS) se utilizó el modelo expresado en la Ecuación 5, este modelo fue seleccionado por su nivel de coeficiente de determinación (R^2) que fue el más elevado.

$$ICS_{IN} = x_1 + (x_2 / ICS_{IA}) + x_3 * t + x_4 * (t)^2 + x_5 * (t)^3 \quad (5)$$

Donde:

ICS_{IN} =Valor del índice de calidad de superficie en intemperismo natural

ICS_{IA} =Valor del índice de calidad de superficie en intemperismo acelerado

t = tiempo in horas

Para los 2-way-Anova y los análisis de regresión entre los parámetros de color (L^* , a^* y b^*), ΔE^* y el SQI en relación al tiempo de exposición se utilizó el programa estadístico SAS 8.1 para Windows (SAS Institute Inc., Cary, N.C.) y un nivel de significancia de $P < 0,05$.

Resultados

Coloración inicial de la madera y efectos de la aplicación de acabados

Los parámetros de color en la superficie de la madera de *A. mangium*, *C. odorata* y *T. grandis* con los diferentes tipos de acabado (natural, barniz y poliuretano) antes del envejecimiento acelerado o natural (Cuadro 3) presentaron valores positivos en los parámetros L^* , a^* y b^* . La aplicación de los acabados: barniz y poliuretano, en la superficie de las especies, generó una disminución de la luminosidad (L^*) y un aumento del color rojizo (b^*) en las tres especies, siendo el acabado poliuretano el que generó los mayores descensos significativos ($\alpha < 0,05$) en el valor de L^* y los mayores aumentos significativos de b^* en comparación al testigo. A su vez, el acabado barniz y poliuretano fueron estadísticamente diferentes entre ellos. En el parámetro a^* la aplicación de los dos tipos de acabados resultó en un aumento significativo ($\alpha < 0,05$), es decir, un aumento del color rojizo en la madera, para las especies *A. mangium* y *T. grandis*.

Entre los acabados de barniz y poliuretano no se presentó diferencia significativa en el valor a^* . No obstante que en *C. odorata* el acabado barniz tampoco afectó significativamente el parámetro a^* , el acabado de poliuretano sí generó un aumento significativo de este parámetro, en relación con el acabado natural y el acabado barniz.

Los valores diferenciales del ΔE^* en las diferentes combinaciones de especies con los diferentes acabados de superficie en los dos intemperismos evaluados se presentan en el Cuadro 2. En él se observa que los valores de ΔE^* varían de 3,7 a 24,4 en el intemperismo acelerado y de 4,7 a 21,8 en el intemperismo natural.

Además, la aplicación de los diferentes acabados resultó en cambios apreciables, muy notables y colores diferentes porque los valores de ΔE^* fueron mayores a 3,0.

Cuadro 3. Valores iniciales de los parámetros L*, a* y b* del color del duramen de *Acacia mangium*, *Cedrela odorata* y *Tectona grandis* con los diferentes acabados utilizados en los dos intemperismos utilizados.

Especies	Intemperismo	Tratamiento	Parámetro		
			L*	a*	b*
<i>A. mangium</i>	Acelerado	Testigo	59,1 ^A	7,3 ^A	22,9 ^A
		Barniz	47,8 ^B	9,3 ^B	28,2 ^B
		Poliuretano	43,8 ^C	9,4 ^B	32,9 ^C
	Natural	Testigo	56,7 ^A	7,9 ^A	22,7 ^A
		Barniz	46,6 ^B	9,1 ^B	27,2 ^B
		Poliuretano	43,2 ^C	9,4 ^B	32,9 ^C
<i>C. odorata</i>	Acelerado	Testigo	61,0 ^A	11,0 ^A	31,2 ^A
		Barniz	57,6 ^B	12,3 ^A	32,1 ^B
		Poliuretano	52,5 ^C	14,2 ^B	33,6 ^C
	Natural	Testigo	61,8 ^A	11,8 ^A	31,0 ^A
		Barniz	58,0 ^B	12,6 ^A	33,2 ^B
		Poliuretano	52,4 ^C	15,2 ^B	33,1 ^C
<i>T. grandis</i>	Acelerado	Testigo	58,2 ^A	8,9 ^A	29,6 ^A
		Barniz	53,4 ^B	12,3 ^B	34,4 ^B
		Poliuretano	46,5 ^C	13,2 ^B	43,0 ^C
	Natural	Testigo	59,4 ^A	8,3 ^A	28,8 ^A
		Barniz	53,0 ^B	12,0 ^B	34,1 ^B
		Poliuretano	48,3 ^C	12,2 ^B	42,4 ^C

Nota: las letras: A, B y C colocadas como superíndices, corresponden la relación entre los valores de cada parámetro dentro de cada especie para definir si existieron significancias o no, letras diferentes son muestras de variación, letras similares no hubieron diferencias significativas.

Las comparaciones entre acabados en una misma especie, confirma lo que se presentó en los parámetros individuales del color al inicio del ensayo, la aplicación de acabados generaron variaciones visuales en el color testigo, siendo el acabado de poliuretano en las muestras de los dos tipos de intemperismo.

En *C. odorata* la comparación Testigo- barniz presentó un cambio de color apenas apreciable al ojo humano (ΔE^* entre 3 y 6), en barniz- poliuretano y Testigo-poliuretano se dio un cambio del color muy notable (ΔE^* entre 6 y 12).

Con *A. mangium* la comparación entre Testigo-barniz y Testigo-poliuretano presentaron valores superiores a 12, en contraparte poliuretano-barniz se encontró un cambio muy notable del color (ΔE^* entre 6 y 12).

En *T. grandis*, únicamente la diferencia entre barniz- poliuretano se catalogó como muy notable al ojo humano (ΔE^* entre 6 y 12), mientras que la comparación Testigo-barniz y Testigo- poliuretano se dieron valores diferenciales superiores a 12, indicando cambio total de color de la superficie (Cuadro 4).

Las variaciones que se obtuvo de los valores diferenciales del ΔE^* , dentro de cada especie, se debieron a los cambios de los parámetros L^* , a^* y b^* producto de la aplicación de los acabados, lo cual incidió con un aumento del ΔE^* y con ello un valor diferencial mayor. En la comparación del acabados poliuretano con barniz, las variaciones que se generaron son de tipo muy visible (con valores del ΔE^* diferencial de 6,6 a 11,2), esto se debe a la variaciones en los compuestos activos y formulaciones de ambos acabados, los cuales generaron respuestas diferentes en cada especie.

En tanto las comparaciones entre diferentes especies y los diferentes tipos de acabados de la superficie, indican que la gran mayoría se catalogan como muy apreciable al ojo humano (ΔE^* entre 6 y 12) y con cambio de color total (valores superiores a 12).

La única excepción ocurrió en la comparación de *C. odorata* con acabado de barniz y *T. grandis* en superficie natural, ya que su valor es apenas de 4,3; catalogado como apreciable.

Cuadro 4. Valores diferenciales del ΔE^* de las comparaciones del duramen de *Acacia mangium*, *Cedrela odorata* y *Tectona grandis* con los diferentes acabados previos a la exposición al intemperismo natural (diagonal inferior) e intemperismo acelerado (diagonal superior)

Especies	Tratamiento	<i>A. mangium</i>			<i>C. odorata</i>			<i>T. grandis</i>		
		Testigo	Barniz	Poliuretano	Testigo	Barniz	Poliuretano	Testigo	Barniz	Poliuretano
<i>A. mangium</i>	Testigo		11,6	18,4	12,3	12,6	14,3	16,9	13,8	24,4
	Barniz	11,1		6,2	13,6	12,2	13,7	10,5	11,9	15,4
	Poliuretano	17,0	6,6		17,4	14,1	10,0	14,8	10,1	11,1
<i>C. odorata</i>	Testigo	10,5	15,9	18,9		3,7	9,4	13,8	18,3	18,8
	Barniz	11,6	13,3	15,1	4,5		6,6	4,3	14,8	15,6
	Poliuretano	13,4	12,3	10,9	12,2	6,2		8,8	12,2	11,2
<i>T. grandis</i>	Testigo	6,7	12,9	16,7	9,8	6,3	12,7		7,6	18,3
	Barniz	12,7	12,8	10,2	12,3	8,1	13,4	18,2		11,1
	Poliuretano	21,8	15,6	11,1	17,7	13,4	13,6	20,1	9,5	

Cambio del color luego de la exposición al intemperismo natural y acelerado

La exposición al intemperismo (natural o acelerado) de las diferentes especies con los tres acabados produjeron cambios de color totales y diferentes en las mayoría de los casos ($\Delta E^* > 12$) (Figura 3). Se obtuvo un ΔE^* inferior a 12 en el acabado poliuretano y testigo en intemperismo natural (Figura 3). Así mismo, en todos los acabados de las diferentes especies, el cambio de color (ΔE^*) en intemperismo natural es mayor que los cambios ocurridos en el intemperismo acelerado.

En general se observa que en la especie *A. mangium* se presentó los valores más bajos de ΔE^* (por tanto menor cambio de color) en relación a las otras dos especies y en los dos tipos de intemperismo. Seguidamente *T. grandis* presenta valores similares de ΔE^* en madera con la superficie natural y acabada con barniz, indicando con ello un cambio de color similar. En relación con el acabado de poliuretano el intemperismo natural presentó mayor cambio de color en *C. odorata* con respecto a *T. grandis*, pero en el intemperismo acelerado la especie de mejor comportamiento fue *C. odorata* (Figura 3).

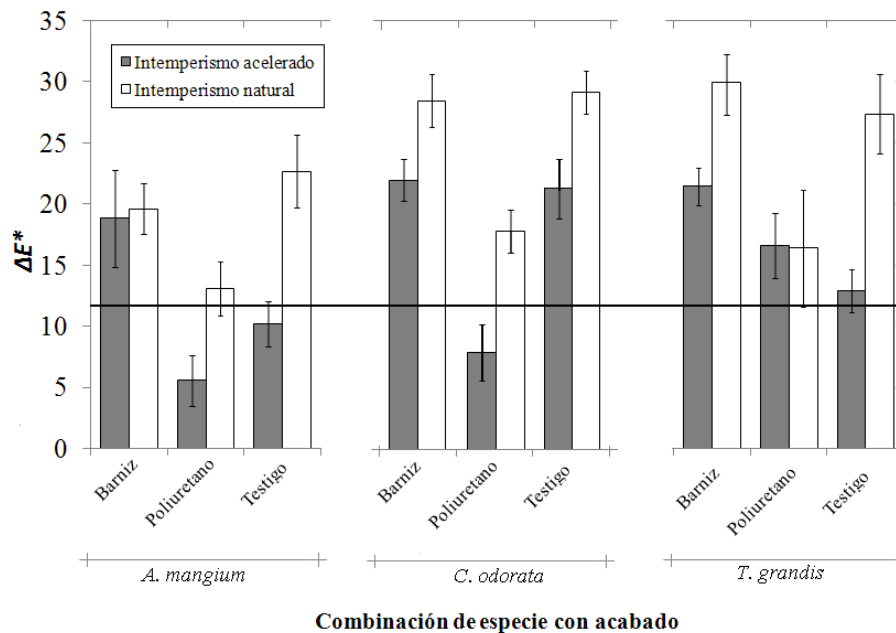


Figura 3. Valores del ΔE^* obtenidos al exponer el duramen de *A. mangium*, *C. odorata* y *T. grandis* con tres acabados, al intemperismo natural y acelerado

Comparación de la variación de L^ , a^* , b^* y ΔE^* con el tiempo en intemperismo acelerado y natural^{†‡}*

Acacia mangium

En la superficie en estado natural, el valor de L^* decrece similarmente en ambos intemperismos, el decrecimiento se dio hasta 200 horas en intemperismo acelerado y 200 días en intemperismo natural; posterior a este periodo el intemperismo acelerado aumentó L^* nuevamente y por el contrario en el intemperismo natural tendió a mantenerse (Figura 3a). El comportamiento hasta las 200 horas, nos sugiere que 200 horas de intemperismo acelerado afecta de la misma manera el parámetro L^* con respecto a la exposición durante 200 días a el intemperismo natural de esta especie, pero luego de ese periodo ya no es posible comparar los resultados. Los efectos en el parámetro L^* en el acabado con barniz y poliuretano en intemperismo acelerado son decreciente con el tiempo hasta aproximadamente 200 horas, posteriormente en el barniz el valor tiende a aumentar y en el poliuretano a mantenerse. Pero en el intemperismo acelerado el comportamiento de L^* con el tiempo de exposición es muy diferente al intemperismo natural, en el caso del barniz, L^* aumenta su valor hasta los 100 días; posteriormente este tiende a decrecer y en el caso de acabado con poliuretano, L^* aumenta su valor hasta aproximadamente 250 días (Figura 4a). No es posible establecer similitudes en el parámetro L^* entre las muestras a las que se les aplicó el acabado barniz en relación con el tiempo en los dos tipos de intemperismo, acelerado y natural.

Para el parámetro a^* , la variación con el tiempo de exposición es diferente entre intemperismo acelerado e intemperismo natural (Figura 4b). Durante los primeros 100 días, los tres tipos de acabados en la superficie de madera expuestas a intemperismo acelerado tendieron a aumentar su valor, mientras lo acabados en el intemperismo natural disminuyeron su valor. Posterior a los 100 días de exposición el valor de a^* disminuyó en los tres tipos de acabado de superficie en intemperismo acelerado, en tanto que este

[†] Destacar el coeficiente de correlación utilizado para el tiempo en intemperismo acelerado en horas el cual se multiplicó por 1,43 para pasarlo a días.

parámetro se mantuvo cerca del valor cero en el acabado natural en intemperismo natural, a diferencia de los otros dos acabados que disminuyeron hasta el final de la prueba (Figura 4b).

La variación del parámetro b^* en los dos tipos de exposición fueron de comportamiento diferente en la superficie al natural y con alguna similitud en el acabado con barniz y poliuretano (Figura 4c). Los primeros 100 días en intemperismo natural, el valor de b^* decreció aceleradamente, posterior a ese periodo el valor se mantuvo constante, en tanto que en el intemperismo acelerado el valor fue relativamente constante hasta los 250 días para luego decrecer ligeramente hasta el final del tiempo de exposición (350 días). En el acabado con barniz, se presenta valores similares hasta 150 días y 200 horas para el intemperismo acelerado y natural, respectivamente. Luego de esto, en ambos casos decreción, pero con mayor intensidad en intemperismo natural. En el caso del muestras con poliuretano se presente la misma tendencia, es decir el parámetro b^* disminuye con el tiempo de exposición (Figura 4c).

El cambio del color (ΔE^*) en relación al color inicial es presentado en la figura 4d. En la superficie en estado natural no se presentaron similitudes entre ellas; en el caso de intemperismo natural el valor ΔE^* aumentó considerablemente hasta los primeros 200 días de exposición, posteriormente este tiende a aumentar ligeramente. En el caso de intemperismo acelerado, el comportamiento es totalmente diferente, hasta los 200 días es relativamente constante, posteriormente tiende a decrecer hasta los 300 días y luego se dio un leve aumento hasta el final de la prueba (350 días). Para el acabado con barniz, la variación del color es relativamente similar entre los dos tipos de exposición, un aumento de ΔE^* al iniciar, luego un decrecimiento hasta el final de la exposición (Figura 4d). En las muestras con acabado de poliuretano se presentó diferencia en las tendencias de ambos intemperismos; el valor de ΔE^* en intemperismo acelerado fue constante a lo largo de la exposición, mientras que en el intemperismo natural, el valor decreció hasta los 150 días, para luego volver a incrementar (Figura 4d).

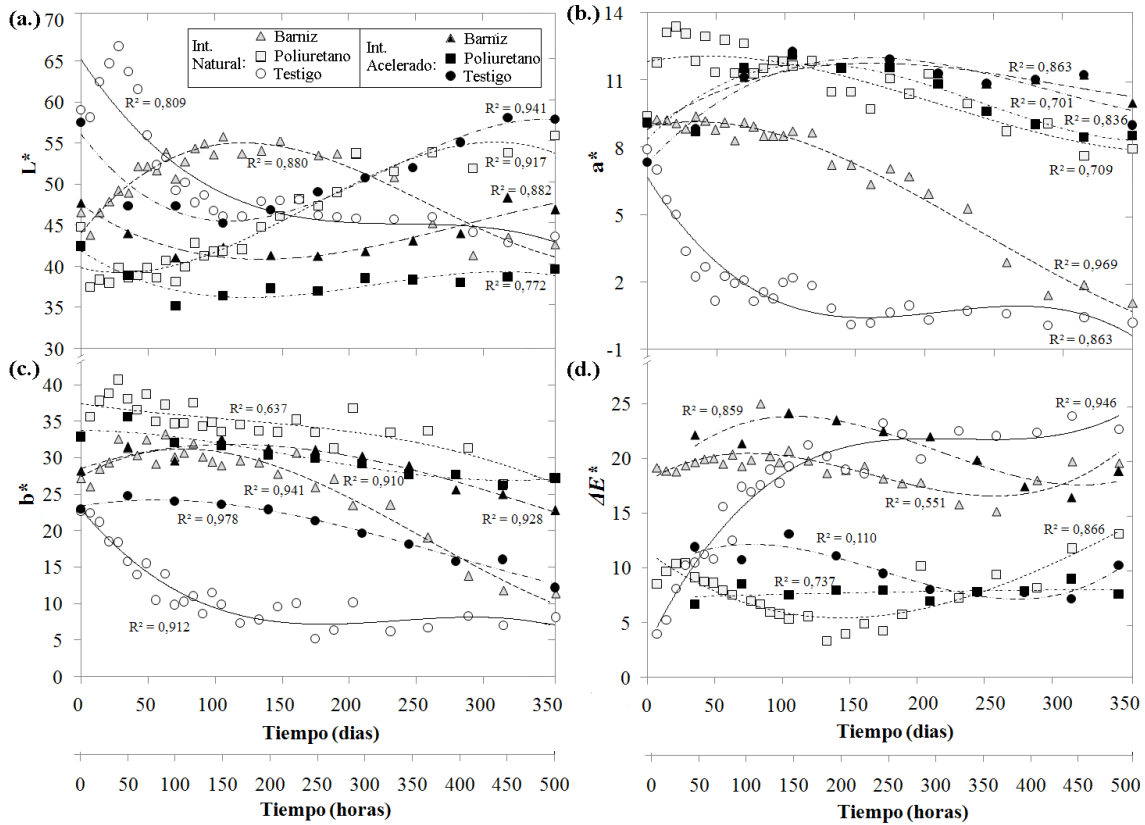


Figura 4. Variaciones en el tiempo de los parámetros L^* , a^* , b^* y ΔE^* , en duramen de *A. mangium* con tres acabados expuestos al intemperismo natural y acelerado.

Cedrela odorata

En la especie *C. odorata*, la variación de L^* en el testigo fue similar (Figura 5a), solo que el intemperismo natural presentó mayores valores que el intemperismo acelerado hasta las 400 horas o 250 días. En tanto, las muestras con acabado de barniz, la variación de L^* con el tiempo es muy diferente; en el intemperismo acelerado, hasta los 75 días (100 horas) el valor disminuye, luego se empezó a estabilizar hasta los 250 días, para finalmente decrecer hasta el final de la prueba. En el intemperismo natural, por el contrario, hay un crecimiento hasta las 100 días, después inicia un decrecimiento de L^* hasta el final del experimento (Figura 5a), el cual solo se pudo comparar posterior a los 100 días de exposición. En las muestras con acabado de poliuretano la variación de L^* fue muy diferentes entre los dos tipos de exposición, en el intemperismo natural el valor de L^* aumentó durante toda la

exposición, mientras que en el intemperismo acelerado el valor tendió a decrecer, por ende no se podían comparar entre sí (Figura 5a).

La variación del parámetro a^* (figura 5b) en la superficie natural decreció aceleradamente hasta los 150 días en el intemperismo natural, para luego mantenerse, este es un comportamiento similar al reportado por Valverde y Moya (2010) para esta especie expuesta a intemperismo natural; en tanto que en el intemperismo acelerado hubo un comportamiento ligeramente similar, pero el decrecimiento no fue de la misma intensidad que al del intemperismo natural. En las muestras con acabado de barniz, la variación fue diferente hasta las 200 horas (intemperismo acelerado) o 150 días (intemperismo natural). En el primer caso aumentó y luego decreció, posterior a ese tiempo ambos decrecieron, pero en el intemperismo natural el decrecimiento fue mayor que en el intemperismo acelerado. Finalmente en las muestras con el acabado de poliuretano, nuevamente fue diferente entre los dos tipos de exposición, el intemperismo acelerado aumentó hasta los 200 días y luego decreció, en tanto que intemperismo natural decreció hasta los 250 días para luego mantenerse relativamente constante (Figura 5b).

La variación del parámetro b^* (Figura 5c) en la superficie natural en los dos tipos de intemperismo decrece con el tiempo de exposición; sin embargo, el comportamiento es ligeramente diferente, en el intemperismo natural el valor de b^* decrece rápidamente hasta los 100 días, para luego mantenerse, en tanto que en el intemperismo acelerado ocurre un ligero aumento hasta 100 horas, para luego decrecer, Valverde y Moya (2010) encontraron un comportamiento similar en el testigo de esta especie en intemperismo natural durante los primeros 200 días de exposición. En muestras con acabado de barniz, la variación del parámetro b^* , nuevamente decrece con el tiempo en los dos tipos de intemperismo, registrando los valores más bajos el intemperismo acelerado. En las muestras con el acabado de poliuretano, la variación del amarillamiento presentan la misma tendencia en los dos tipos de intemperismo, pero a diferencia de los parámetros anteriores, donde se presentaron los valores más altos, se presentan más bajos en el intemperismo natural.

Finalmente, la variación de ΔE^* (figura 5d) en la superficie natural y con barniz fue mayor en el intemperismo natural que en el intemperismo acelerado, pero en el caso de la superficie con poliuretano se presentó un comportamiento diferente. En lo referente a la similitud entre ambos tipos de intemperismo, en la superficie natural el mayor cambio de color se presentó en los primeros 150 días del intemperismo natural, en tanto que en el intemperismo acelerado este cambio de color no es tan intenso. En el caso del barniz, la variación de ΔE^* fue similar entre los dos tipos de intemperismo, solo que el mayor cambio de color se da en intemperismo acelerado. Finalmente, el cambio de color en el poliuretano, presenta una variación similar, pero tal como se ha mencionado, el mayor cambio se da en el intemperismo acelerado.

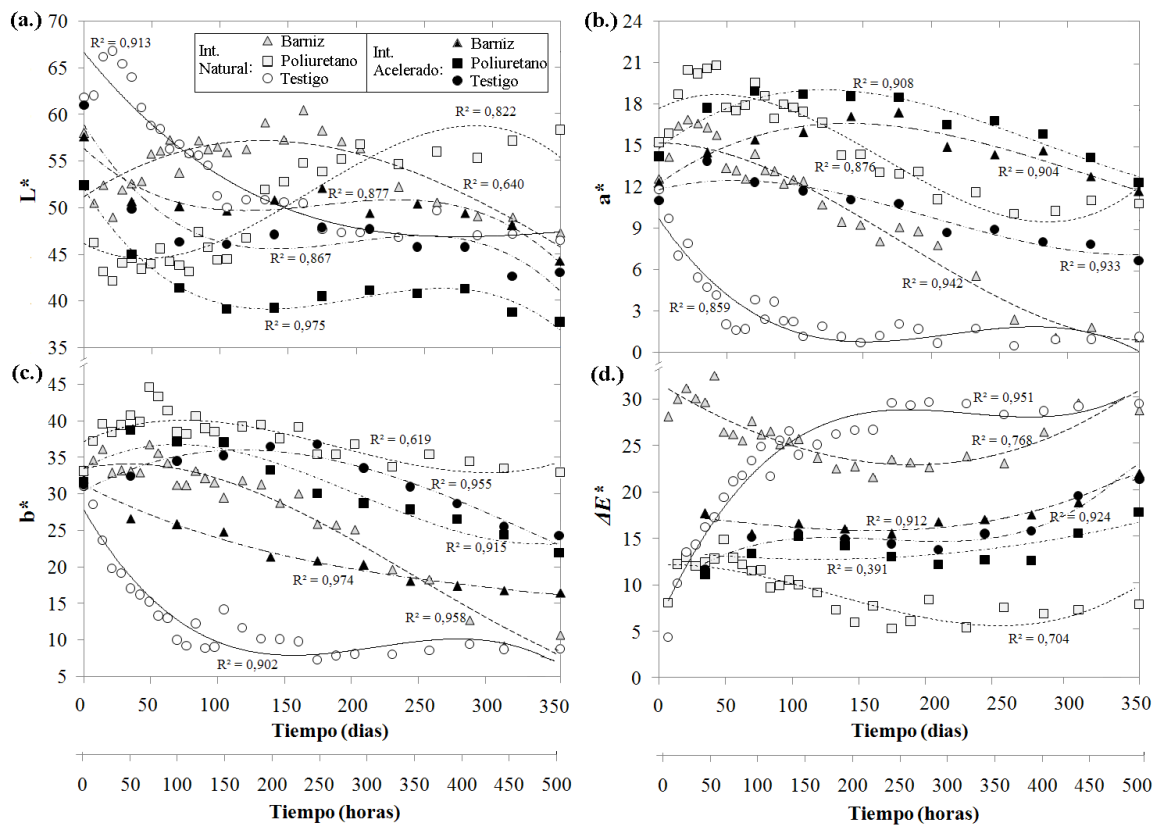


Figura 5. Variaciones en el tiempo de los parámetros L^* , a^* , b^* y ΔE^* , en duramen de *C. odorata* con tres acabados expuestos al intemperismo natural y acelerado

Tectona grandis

En la superficie de las muestras testigo de *T. grandis* el comportamiento del parámetro L^* (Figura 6a) es similar para ambos intemperismos en los primeros 100 días, en este caso se observa un decrecimiento del valor de L^* ; posterior a los 100 días el comportamiento varia en ambos tipos de exposición, en intemperismo acelerado se dio un aumento de L^* hasta los 300 días y después tendió a decrecer, mientras en el intemperismo natural después de los 100 días se estabilizó el valor de L^* hasta los 300 días y luego decreció hasta el final de la prueba. En el caso de las muestras con barniz el comportamiento descendente en los primeros 100 días fue similar en ambos intemperismos, con la diferencia que en intemperismo acelerado la pérdida de valor L^* fue mayor en comparación al intemperismo natural. Luego de este tiempo de exposición el comportamiento varió, en intemperismo natural se mantuvo el decrecimiento hasta el final de la prueba, mientras en intemperismo acelerado de los 100 a 150 días se estabilizó y posteriormente tendió a aumentar hasta el final de la prueba. En muestras con poliuretano se mantuvo un comportamiento descendente del valor de L^* , similar en los primeros 100 días (Figura 6a), luego se dio un aumento hasta los 250 días; posteriormente el comportamiento difiere entre ambos intemperismos, siendo decreciente en intemperismo natural y creciente en intemperismo acelerado, hasta al final de la prueba.

Con respecto al parámetro a^* (Figura 6b), el testigo se comportó muy diferente en ambos intemperismos, en intemperismo acelerado la tendencia fue casi constante en el periodo de duración de la prueba, por el contrario en intemperismo natural, en los primeros 100 días el valor decrece, posteriormente se estabilizó hasta los 300 días para nuevamente iniciar con un leve descenso hasta el final de la prueba, con dichas variaciones no es posible comparar dicho acabado en ambos intemperismos. En muestras con barniz durante los primeros 100 días se dio un comportamiento ascendente del valor de a^* para ambos intemperismos, posterior a los 100 días los comportamientos cambian, en el intemperismo natural se dio un descenso del valor de a^* hasta el final de la prueba mientras que en el intemperismo acelerado se mantuvo con pocas variaciones. Finalmente, en muestras con poliuretano se encontró comportamientos distintos en ambos intemperismos, en el intemperismo natural se dio un aumento del valor de a^* en los primeros 100 días y después de este tiempo empezó a

disminuir hasta el final de la prueba. En el intemperismo acelerado el valor se mantuvo constante (Figura 6b).

El parámetro b^* (Figura 6c), para muestras testigo no se puede comparar en ambas condiciones de exposición, en el intemperismo acelerado durante los primeros 100 días se dio una disminución muy leve y posterior a ello se estabilizó hasta el final de la prueba, mientras que en el intemperismo natural se da una decrecimiento de L^* en los primeros 100 días y posteriormente se estabilizó hasta los 250 días para luego decrecer hasta el final de la prueba. Las superficies con barniz se comportaron de manera distinta en ambos intemperismos, en intemperismo acelerado se dio un aumento del parámetro b^* durante los 100 días, después disminuyó hasta los 300 días, para nuevamente aumentar hasta el final del ensayo. En contraparte, en intemperismo natural se mantuvo un leve decrecimiento en los primeros 150 días y después el descenso fue mayor. El comportamiento de las superficies con acabado de poliuretano expuesto en ambos intemperismo fue similar durante todo el tiempo de la prueba, en este caso se dio un descenso del valor de b^* en los primeros 300 días y posteriormente un aumento hasta el final de la prueba, aunque la tendencia en ambos intemperismos es similar, la magnitud del cambio en el valor de b^* fue mayor en el intemperismo acelerado (Figura 6c).

En el ΔE^* (cambio del color), figura 6d, se determinó que el comportamiento de las muestras testigo difirió en ambos intemperismos, en el intemperismo acelerado la tendencia fue a aumentar levemente en los primeros 100 días, después decreció hasta los 250 días y nuevamente creció hasta el final de la prueba; mientras en el intemperismo natural en los primeros 100 días el ΔE^* aumentó considerablemente, después se estabilizó hasta los 300 días y finalmente tendió a aumentar hasta el final de la prueba. En superficies con barniz el comportamiento fue similar en todo el periodo de estudio, hubo un aumento del ΔE^* hasta los 100 días, después se estabilizó hasta los 200 días para finalizar con un aumento del ΔE^* (Figura 5d). Finalmente, en superficies con poliuretano la tendencia de ambos métodos de exposición fue similar en los primeros 250 días donde se observó un aumento del ΔE^* , pero de los 250 a 350 días varió, en intemperismo acelerado el comportamiento fue decreciente, mientras en intemperismo natural la tendencia fue a aumentar el valor del ΔE^* . Los valores de ΔE^* muestran que los testigos variaron con el intemperismo lo cual es señal de que

ocurrió degradación de lignina y celulosa en conjunto por la formación de grupos carbonilos (George *et al.* 2005) y esto tiene una magnitud mayor en intemperismo natural; con el uso de acabados esta especie presentó un comportamiento similar durante el periodo de la prueba (Poliuretano en 350 días y barniz 250 días), lo cual muestra que el comportamiento de los acabados es similar y por ende la degradación de los acabados en dicho periodos de tiempo y las meteorización del color varía muy poco en un ambiente controlado como es el intemperismo acelerado con un ambiente cambiante con variaciones en radiación, humedad entre otras, que es el intemperismo natural.

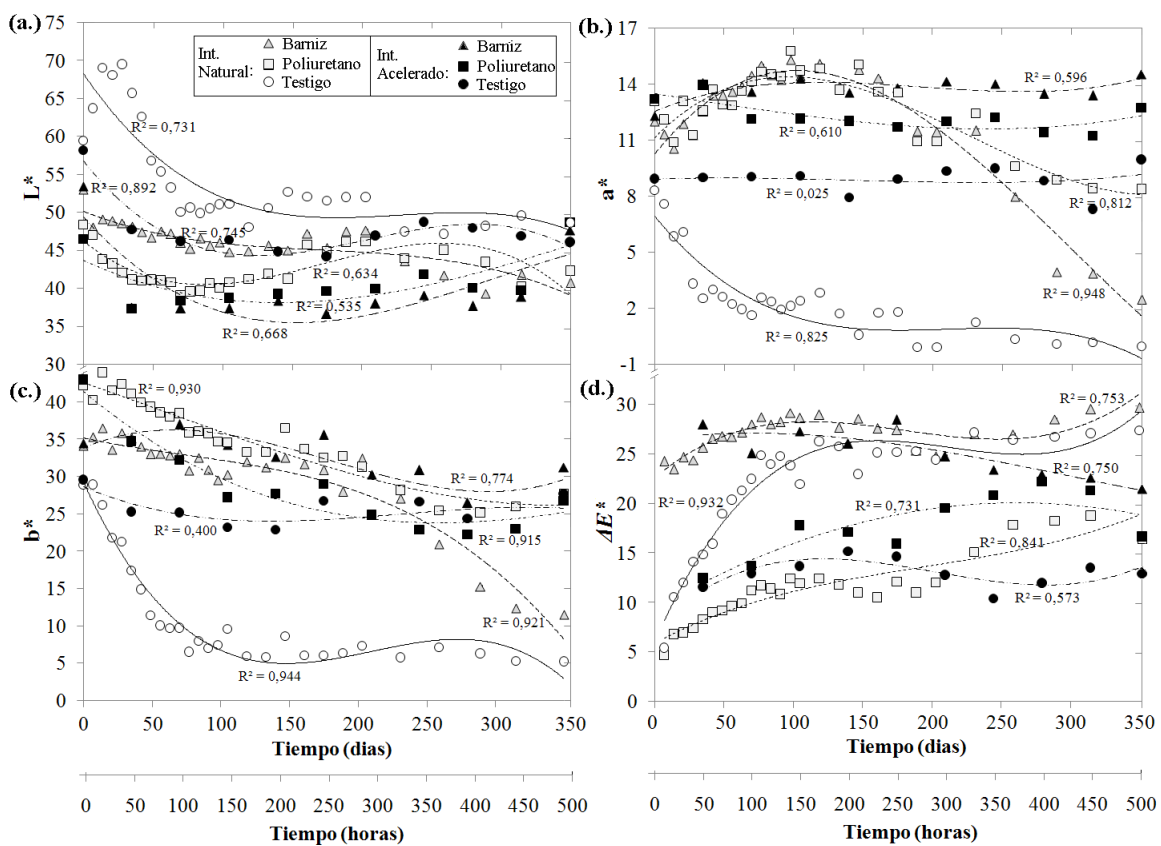


Figura 6. Variaciones en el tiempo de los parámetros L^* , a^* , b^* y ΔE^* , en duramen de *T. grandis* con tres acabados expuestos al intemperismo natural y acelerado

Apariencia y comportamiento de los acabados

La calidad del acabado en la superficie, medida por el índice de calidad, de los diferentes tipos de maderas estudiadas tendió a disminuir con el tiempo (Figura 7). El principal resultado al evaluar la variación de índice de calidad con el tiempo de exposición es que el acabado de tipo poliuretano presentó el mismo comportamiento en el intemperismo acelerado e intemperismo natural para las tres especies. A diferencia de la superficie natural y las superficies con acabado de barniz, en los cuales el intemperismo natural afectó en mayor grado la calidad de superficie de la madera, dando como resultado un índice de calidad menor que el de superficies expuestas a intemperismo acelerado.

La calidad de la superficie con acabado natural fue la que disminuyó más rápidamente. en ambos tipos de intemperismo (Figura 7). En el intemperismo natural, el índice de calidad decreció rápidamente hasta los 100 días de exposición, para luego mantenerse, a diferencia del intemperismo acelerado que decrece relativamente constante y de menor magnitud, en especial en *T. grandis* (Figura 7c). En las superficies con barniz, nuevamente el índice de calidad disminuye más rápidamente en intemperismo natural con respecto al intemperismo acelerado; no obstante, los valores del índice de calidad son de poca diferencia en la especie (Figura 7c) al comparar esto con las especies *A. mangium* (Figura 7a) y *C. odorata* (Figura 7b). En las superficies con acabado de poliuretano por su parte, como se mencionó antes, el índice de calidad disminuye de manera similar con el tiempo de exposición al intemperismo en las tres especies; sin embargo, en la especie *C. odorata* los valores del índice de calidad en intemperismo acelerado son más altos que los encontrados en intemperismo natural (Figura 7b), a diferencia de *A. mangium* y *T. grandis* que se presentan con menor diferencia entre los valores del índice de calidad en intemperismo natural e intemperismo acelerado (Figura 7a y 7c).

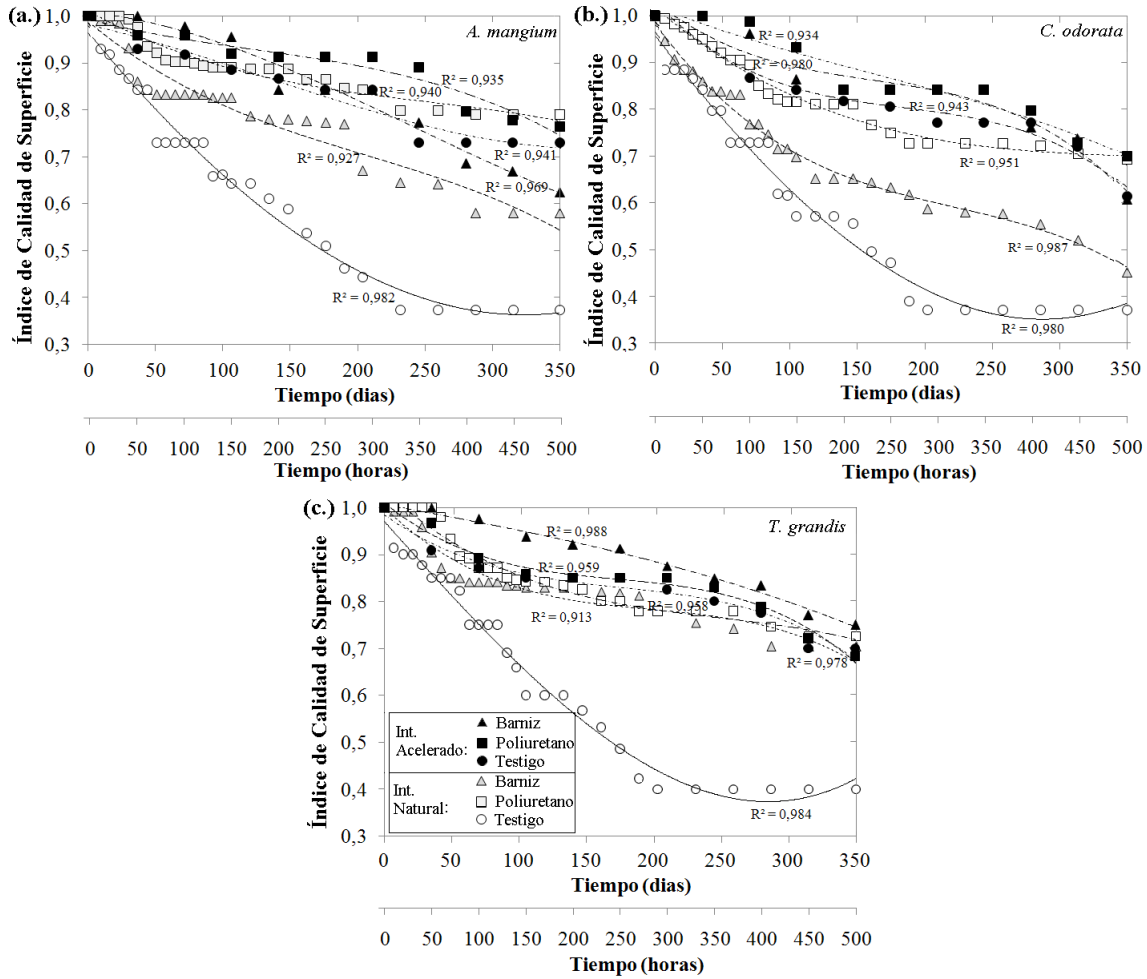


Figura 7. Comportamiento en el tiempo del Índice de Calidad de Superficie en duramen de *A. mangium*, *C. odorata* y *T. grandis* con tres acabados expuestos al intemperismo natural y acelerado

Modelación matemática de la variación del color (ΔE^) y calidad de superficie en intemperismo natural en relación al ΔE^* y calidad de superficie en intemperismo acelerado y el tiempo*

Se determinó que el valor ΔE^* en intemperismo natural puede ser moldeado con respecto al ΔE^* en intemperismo acelerado y el tiempo expresado en horas con la ecuación:

$\Delta E_{IN}^* = x_1 + (x_2 / \Delta E_{IA}^*) + x_3 * t + x_4 * (t)^2 + x_5 * (t)^3$. En el Cuadro 4, se muestran que los coeficientes de determinación (R^2) alcanzaron valores de 0,99 en todas las combinaciones de especie con acabado. Además, se destaca que el porcentaje de error obtenido es muy bajo y varió de 0,60 % a 2,07 %; lo cual muestra un grado de ajuste del modelo, bastante alto. Es importante destacar que los mayores porcentajes de error se presentaron en las muestras testigo, las cuales tuvieron de errores de 1,19 % a 2,07 %; en contraparte los acabados presentaron porcentajes de error más bajos. Al comparar ambos acabados, se determinó que el acabado poliuretano presentó la menor variabilidad del error (de 0,70% a 0,83%) en comparación al barniz (0,60% a 0,87%).

En cuanto el índice de calidad de superficie (ICS), se encontró que el modelo:

$ICS_{IN} = x_1 + (x_2 / ICS_{IA}) + x_3 * t + x_4 * (t)^2 + x_5 * (t)^3$, fue el que mejor se ajustó para linealizar el comportamiento de ICS en intemperismo natural con respecto al ICS en intemperismo acelerado y el tiempo de exposición, el coeficiente de determinación obtenido también fue de 0,99 y los porcentajes de error se dieron de 0,28 a 0,35 siendo una variación muy baja. En este caso para el modelo de las muestras testigo fue donde se presentó el mayor error (de 0,37 a 0,35), mientras que los modelos para las superficies con acabados mostraron errores menores, siendo el acabado poliuretano el que dio los valores más bajos (de 0,28 a 0,27).

Cuadro 5. Coeficientes de linealización del modelo de cambio del color (ΔE^*) e índice de calidad de superficie (ICS) coeficientes de determinación (R^2) y porcentaje de error para los residuos.

Modelo	Especie	Tratamiento	Coeficientes del modelo					R^2	Error (%)
			A	b	c	d	e		
ΔE^*	<i>A. mangium</i>	Testigo	-3,93*	0,74*	0,13 ^{ns}	-2,79x10 ⁻⁴ *	1,99x10 ⁻⁷ *	0,99	1,63
		Barniz	17,40**	9,89*	0,05 ^{ns}	-3,22x10 ⁻⁴ **	4,48x10 ⁻⁷ **	0,99	0,60
		Poliuretano	13,87**	-15,89*	-0,07**	1,98x10 ⁻⁴ **	-1,18x10 ⁻⁷ **	0,99	0,85
	<i>C. odorata</i>	Testigo	7,02**	-0,38*	0,22**	-6,94x10 ⁻⁴ **	6,99x10 ⁻⁷ **	0,99	2,07
		Barniz	5,05*	1,50**	-0,04**	1,05x10 ⁻⁴ **	-9,10*10 ⁻⁸ **	0,99	0,66
		Poliuretano	12,27**	-0,62*	3,15x10 ⁻³ **	-1,63x10 ⁻⁴ **	2,90x10 ⁻⁷ **	0,99	0,70
	<i>T. grandis</i>	Testigo	5,61**	3,62 ^{ns}	0,22**	-7,77x10 ⁻⁴ **	8,48x10 ⁻⁷ **	0,99	1,19
		Barniz	30,65*	-0,30*	0,09**	-3,97x10 ⁻⁴ **	5,01x10 ⁻⁷ **	0,99	0,87
		Poliuretano	5,98**	-0,97*	0,05**	-1,31x10 ⁻⁴ **	1,58*10 ⁻⁷ **	0,99	0,70
ICS	<i>A. mangium</i>	Testigo	1,29**	-0,34 ^{ns}	-2,3x10 ⁻³ **	1,61x10 ⁻⁶ **	1,5x10 ⁻⁹ *	0,99	0,35
		Barniz	1,18**	-0,20 ^{ns}	-1,78x10 ⁻³ **	4,22x10 ⁻⁶ **	-4,30x10 ⁻⁹ **	0,99	0,30
		Poliuretano	0,95**	0,04 ^{ns}	-5,83x10 ⁻⁵ **	1,33x10 ⁻⁷ **	-2,71x10 ⁻⁹ **	0,99	0,28
	<i>C. odorata</i>	Testigo	0,98**	0,03 ^{ns}	-2,01x10 ⁻³ **	9,13x10 ⁻⁷ **	9,50x10 ⁻¹⁰ **	0,99	0,37
		Barniz	27,75**	-66,91**	54,92**	-14,37**	-9,39x10 ⁻⁴ **	0,99	0,30
		Poliuretano	0,86**	0,16 ^{ns}	-1,59x10 ⁻³ **	2,39x10 ⁻⁶ **	-1,53x10 ⁻⁹ **	0,99	0,27
	<i>T. grandis</i>	Testigo	0,94**	0,01 ^{ns}	-2,78x10 ⁻³ **	6,28x10 ⁻⁷ ^{ns}	4,55x10 ⁻¹⁰ **	0,99	0,35
		Barniz	1,01**	-50,01 ^{ns}	-1,90x10 ⁻³ **	3,38x10 ⁻⁶ **	-3,91x10 ⁻⁹ **	0,99	0,25
		Poliuretano	1,74**	-1,03**	0,25**	-5,67x10 ⁻⁴ **	5,01x10 ⁻⁷ **	0,99	0,28

Nota: **estadísticamente significativa a 99%, *estadísticamente significativa a 95% y ns=no significativa.

Discusión

Coloración inicial de la madera y efectos de la aplicación de acabados

El color de la madera de *A. mangium*, *C. odorata* y *T. grandis* para los diferentes tipos de tratamientos de superficies (Cuadro 2) es una combinación de tonos blancos (L^*), rojos (a^*) y amarillos (b^*), el cual es un patrón muy común en las maderas tropicales (Nishino *et al.* 1998, Janin *et al.* 2001).

La aplicación de los acabados de tipo poliuretano y barniz, generan variaciones en los parámetros (L^* , a^* y b^*) y el parámetro ΔE^* en relación al color natural de la madera (Cuadro 2 y 3). Los compuestos activos de cada acabado (prepolímero de uretano en poliuretano y resinas y aceites en barniz) en conjunto con compuestos estabilizadores de lignina, absorbentes de luz UV y agentes antioxidantes (Williams 2005, George *et al.* 2005, Builian y Graystone 2009) reaccionan químicamente con la lignina, la celulosa, la hemicelulosa y los extraíbles presentes en la madera (Williams 2005, George *et al.* 2005, Schaller y Rogez 2007, Builian y Graystone 2009), dando como resultado una interacción química entre la madera y el acabado; provocando un cambio en la magnitud de los parámetros L^* , a^* y b^* (Cuadro 1), y por tanto una variación del ΔE^* (Cuadro 3), en las tres especies estudiadas. Así mismo, la composición química de los diferentes tipos de acabados, provocaron diferentes interacciones con la madera (Temiz *et al.* 2007 Sivrikaya *et al.* 2011), dando como resultado también diferencia en los parámetros de color y ΔE^* entre dos los dos tipos de acabado (Cuadro 2 y 3).

La poca variación obtenida en el parámetro rojizo (a^*), en comparación a los parámetros L^* y b^* , con la aplicación de los acabados puede ser explicado por la interacción de la superficie de madera y el acabado (de Meijer y Nienhuis 2009). Si bien los acabados evaluados son transparentes, al momento de interactuar con la superficie de la madera, sustancias como los estabilizadores de luz UV y antioxidantes, para aumentar la resistencia al intemperismo, presentes en el acabado generan oscurecimiento del color (Builian y Graystone 2009), pero se hace imposible mantener el color natural de la madera (Jwitt 2000), afectando principalmente el parámetro de luminosidad (L^*) y amarillos (b^*).

Estudios desarrollados por George *et al.* (2005) han encontrado que la poca variación de los colores rojizos (a^*) en la madera se deben a que en los acabados hay antioxidantes inorgánicos, tales como hierro micronizado transparente, dióxido de carbono, dióxido de titanio y dióxido de zinc, que evitan que se den mayores coloraciones rojizas en la madera.

Cambio del color luego la exposición al intemperismo natural y acelerado

Los valores obtenidos del ΔE^* de las tres especies (con sus respectivas combinaciones con acabados) posterior a las exposición al intemperismo natural y intemperismo acelerado (Figura 3), fueron en su mayoría superiores al valor de 12 (exceptuado *C. odorata* con poliuretano), por lo cual se dio una variación total del color según la clasificación de Cui *et al.* (2004). Este cambio fue provocado por los procesos de fotodegradación que se dan en la madera que es expuesta al intemperismo acelerado o al intemperismo natural donde influye la radiación UV, la lluvia, y otros (George *et al.* 2005, Deka *et al.* 2009). El primer compuesto que se comienza a degradar en la madera es la lignina (George *et al.* 2005, Ghost *et al.* 2009) producto de la absorción de luz UV (absorbe entre un 85 a 90 % de este tipo de luz), con ello descomponen los grupos metoxilos y se comienza a formar grupos carbonilos y de cromofórmicos de carboxilo (George *et al.* 2005, Deka *et al.* 2009); además, se da la degradación de extraíbles por la luz UV (Pandey 2005); con la pérdida de lignina, extraíbles la madera empiezan a tomar una coloración grisácea la cual infiere en un una disminución de L^* (Figura 4a) y un aumento del ΔE^* en los primeros días (Figura 3).

Como es de esperar, el uso de acabados fue variante de los valores finales del ΔE^* (Figura 3.). La función del acabado para exteriores es evitar la degradación de las propiedades físicas (este caso color), el cual comenzará a degradarse por la incidencia de luz UV, agua, temperatura, entre otros factores (Schabell y Rougez 2007). Si el acabado es de baja resistencia, la madera rápidamente se verá degradada dando como resultado que el color sea una de las primeras características que se ve afectada (de Meijer y Nienhuis 2009). En las formulaciones químicas de los acabados se han desarrollado múltiples estrategias para evitar la fotodegradación, entre los cuales la modificación de las moléculas OH presentes en las paredes celulares por acetilación es uno de los métodos químicos más utilizados en

los acabados, que es un compuesto más estable y que reduce los efectos de la luz UV en la lignina (Williams 1999, George *et al.* 2005).

Con el uso del acabado de tipo poliuretano se produjo un menor cambio con respecto a utilizar el acabado de barniz (Figura 3). La variación en el valor de ΔE^* entre los acabados es debido a que los dos tipos de acabados contienen compuesto activos diferentes los cuales son vitales para una buena cohesión del acabado con la superficie (Schabell y Rougez 2007, Evans *et al.* 2008, de Meijer y Nienhuis 2009). Si esta cohesión no es capaz de soportar la tensión superficial que se produce durante la exposición al intemperismo, se empezará a degradar el acabado y con ello se producen variaciones considerables en el color (de Meijer y Nienhuis 2009). Las superficies con acabado tipo poliuretano, con lo prepolímeros de uretano como compuesto activo, presentó un mejor comportamiento que los aceites y resinas del barniz; como mencionan Bulian y Graystone (2009), una composición química compleja que permita una mayor interacción entre el sustrato y el acabado permite un mejor rendimiento que se denota con una mayor duración y calidad del acabado.

De la variación obtenida del ΔE^* entre intemperismo natural e intemperismo acelerado al final de la exposición (Figura 3) y durante el tiempo de exposición (Figura 4d, 5d, y 6d), se destaca que el intemperismo natural obtuvo los valores del ΔE^* mayores, sin importar la especie o acabado utilizado. Esta variación entre ambos intemperismos se debe a que en el intemperismo natural se da una variabilidad constante en la radiación solar, humedad, cantidad de agua, en comparación al intemperismo acelerado en el cual se da un Testigo de las condiciones previas en las cuales se siguió un programa cíclico. En relación a estas diferencias Cremmers *et al.* (2002) señala que el intemperismo natural cuenta con una dificultad de reproducir en cámara debido a que la ubicación y época del año en la que se exponen las piezas son específicas lo cual difiere mucho para un protocolo para una región. Así mismo, en el intemperismo acelerado se destaca por la ausencia de contaminación y agentes bióticos que hay en intemperismo natural, estos dos elementos aceleran los procesos de degradación del color (Creemers *et al.* 2002, George *et al.* 2005, Oltean *et al.* 2008, Pandey 2005, Deka *et al.* 2008, Schnabel *et al.* 2009).

En las superficies que utilizan el acabado barniz (es formulado con resinas) con el tiempo tiende a degradarse con facilidad con la radiación de UV y el lavado por las precipitaciones (Bulian y Graystone 2009), además que tienden a responder de manera lenta a los cambios de la tensión superficial lo cual generará la formación de grietas que a la postre generaran pérdida de la película (de Meijer y Nienhuis 2009). Por el contrario, las superficies con el acabado de poliuretano el comportamiento de ambos intemperismo fue igual en L^* en los primeros 100 días solo para *C. odorata* y *T. grandis* y en el ΔE^* durante toda la duración de la prueba (350 días) (figura 5a y 6a) debido a su formulación es más estable y con composición más compleja que el barniz, lo cual permite una mayor interacción con la superficie de la madera y resistencia a la tensión superficial (Ota *et al.* 1997, de Meijer y Nienhuis 2009), este acabado posee sustancias como antioxidantes y estabilizadores de lignina que retardan la pérdida de la coloración amarilla y rojiza de la madera (Bulian y Graystone 2009).

Es importante destacar que la pérdida de la protección de los acabados con el paso del tiempo se debe a que los acabados transparentes son los menos efectivo para usar al intemperismo, estudios desarrollados por George *et al.* (2005) han encontrado que este tipo de acabado es el menos efectivo a largo plazo, debido a que con el tiempo los estabilizadores de lignina y los filtros UV presentes en los acabados pierden su efectividad, permitiendo que se inicie el proceso degradación de la lignina. Además, las luces con una longitud de onda menor a los 450 nm pueden traspasar la película incolora y generar los procesos de fotodegradación, de una manera más lenta (George *et al.* 2005, Pandey 2005), siendo esta la razón por la cual si bien el acabado poliuretano fue el más efectivo, no pudo mantener el color inicial de la madera por un periodo largo.

Finalmente, las variaciones en los valores finales del ΔE^* (Figura 3) y durante el tiempo de exposición (Figura 4d, 5d, y 6d) en cada una de las especies fue menor en *A. mangium*, seguido *T. grandis* y finalmente *C. odorata*, y esto es debido a las variaciones en los compuesto químicos presentes en cada madera y su capacidad de interacción con el acabado (Petric *et al.* 2004, Pandey 2005, Tolvaj y Mitsui 2005, Dawson *et al.* 2008). Probablemente en nuestro estudio se dio una mejor interacción especie- acabado en *A.*

magium, mientras que en *C. odorata* se dio la menor interacción dándose las menores y mayores variaciones del ΔE^* , respectivamente.

Apariencia y comportamiento de los acabados

Se encontró que conforme aumentó el tiempo de exposición al intemperismo (tanto en el natural como en el acelerado) el índice de calidad de la superficie tendió a disminuir en todas las combinaciones de especie con acabado (Figura 7). Este comportamiento se debe a que conforme aumenta el periodo de exposición a la luz UV, a las variaciones de temperatura y humedad relativa en conjunto con la exposición al agua, en la madera se generan procesos de degradación y erosión en los acabados los cual generan la formación de grietas que reducen la calidad (Evans y Banks 1990, Williams *et al.* 1999, William y Feist 2001, Evans *et al.* 2008).

En las piezas testigo de las tres especie, fue donde se obtuvieron los menores valores de calidad debido a que al no tener alguna capa protectora, las diferentes variables ambientales generaron degradación de lignina (Ota *et al.* 1997, George *et al.* 2005, Deka *et al.* 2008), pérdida de extraíbles y celulosa (Pandey 2005, Deka *et al.* 2008), y con ello erosión de la superficie lo cual conllevó a un proceso de degradación considerable (Evans y Banks 1990, Williams *et al.* 1999, William y Feist 2001). En cambio la aplicación de acabados aumentó la calidad de la superficie de las maderas. La poca degradación de la superficie con el acabado poliuretano con el intemperismo, como hemos señalado se debe a una buena interacción del acabado con el sustrato, pero por el contrario en caso del barniz presentó un comportamiento similar al testigo con bajos valores del índice de calidad, esto se debió a una mala resistencia a la tensión superficial y respuesta al ambiente, lo cual propició la formación de flaqueados y craqueados (rajaduras) en los acabado lo cual es muestra de degradación de la calidad del mismo (Evans y Banks 1990, Williams *et al.* 1999, William y Feist 2001, Evans *et al.* 2008, de Meijer y Nienhuis 2009).

Es importante destacar que el índice de calidad varió en el testigo y barniz de las tres especies en ambos intemperismos, mientras el poliuretano fue el único que sin importar la especie no varió en ambos intemperismos. Esto se debió que el nivel de erosión que se genera en intemperismo natural son mayor que en intemperismo acelerado, lo cual conlleva a que la superficie de la madera se genere una mayor tensión y por ende el acabado deba responder de mejor manera (Ota *et al.* 1997, Tovaj y Mitsui 2005); además, que la entrada de factores bióticos como hongos y bacterias que están en el intemperismo natural aceleran los procesos de deterioro (William y Feist 2001, Evans *et al.* 2008).

Modelación matemática del de la variación del color (ΔE^) y calidad de superficie en intemperismo natural en relación al ΔE^* y calidad de superficie en intemperismo acelerado y el tiempo*

En este estudio se encontró que la mayor variación en los parámetros de color y sobre todo en la variación neta del color (ΔE^*), se dieron en intemperismo natural debido a las constantes variaciones en la intensidad de radiación, de los cambios de temperatura, humedad y presencia de precipitación, lo cual genera un mayor desgaste de los acabados en comparación al intemperismo acelerado en el cual las luz UV que se utiliza tienen limitaciones en comparación a la luz natural (Tovaj y Mitsui 2005). Sin embargo, la mayor limitante del intemperismo natural es el periodo de tiempo para obtener los comportamientos y resistencias de los acabados (Ota *et al.* 1997, Tovaj y Mitsui 2005). De manera tal con los modelos determinados para estas combinaciones de especie con acabados se puede dar un patrón de comportamiento a partir de los resultados generados en intemperismo acelerado, los modelos determinados mostraron un alto coeficiente de determinación y a su vez un error mínimo.

En el caso del índice de calidad de la superficie el modelo evaluado mostró un comportamiento muy parecido al determinado con la variación del color, el modelo que se aplicó puede explicar el comportamiento de índice de calidad de acabado en intemperismo natural a partir de los datos de intemperismo acelerado y tiempo de exposición en cámara; debido a que el índice de calidad sufrió una mayor degradación y tensión superficial debido a las variaciones de temperatura y contenido de humedad durante todo el periodo de prueba lo cual generó una mayor tensión superficial que generó fracturas en el acabado (William *et al.* 2000, Williams y Feist 2001) en comparación al intemperismo acelerado que no se llega a tener las tensiones superficiales máximas debido a que los ciclos son constantes en temperatura y humedad lo cual no llegan a exigir al máximo el acabado (Evans *et al.* 2008)

Con la generación de este tipo de modelos para cada región se pueden desarrollar correcciones a los datos generados en intemperismo acelerado y aproximarlos a la realidad, con ello se permitiría evaluar la variación del color y la calidad de un acabado para exteriores en un tiempo menor y una gran exactitud (Creemers *et al.* 2002).

Conclusiones

La aplicación de acabados generó variaciones en el color inicial de la madera, disminución de L^* , aumento de b^* y pocas variaciones de a^* . Estas variaciones por acabados son claramente visibles y totales según la clasificación de Cui *et al.* (2002); por ende los acabados no conservan por completo el color natural de la madera atribuidos a la interacción del sustrato con el acabado y las reacciones que generan los compuestos activos, estabilizadores de lignina entre otros. En cuanto a la calidad de los acabados, se encontró que conforme pasó el tiempo la calidad de todos los acabados en las tres especies estudiadas tendió a disminuir. El acabado de tipo poliuretano no presentó variaciones entre el intemperismo natural y el intemperismo acelerado, mientras con barniz y testigo el mayor decrecimiento de los parámetros de color y el índice de calidad del acabado decreció más en intemperismo natural que en intemperismo acelerado.

Posterior a la exposición de las piezas al intemperismo natural e intemperismo acelerado se encontró que los menores valores del ΔE^* se dieron en intemperismo acelerado debido a las limitaciones en la recreación de las condiciones que se presentan en el intemperismo acelerado. Así mismo, se encontró que el índice de calidad del acabado es mayor en el intemperismo natural en relación con intemperismo acelerado. Por otro lado, las curvas de variación de los parámetro de color (L^* , a^* , b^*), ΔE^* y el índice de calidad de acabado con el tiempo de exposición nuevamente ocurre con mayor intensidad en intemperismo natural y para ambas tipos de exposiciones la variación de parámetro (de color o calidad) fue expresado por la ecuación $Y = x_1 * t^3 + x_2 * t^2 + x_3 * t + x_4$. Las variaciones de los parámetros anteriormente mencionados son atribuidas a un proceso de fotodegradación de los componentes de la madera y la interacción acabado-sustrato.

Finalmente, el cambio de color de la madera expuesta al intemperismo natural puede ser calculado por los datos de ΔE^* ocurridos en intemperismo acelerado y el tiempo de exposición en horas. El modelo propuesto es del tipo $\Delta E_{IN}^* = x_1 + (x_2 / \Delta E_{IA}^*) + x_3 * t + x_4 * (t)^2 + x_5 * (t)^3$, con bajos errores, permitiendo de esta manera generar una herramienta para predecir en corto tiempo los posibles efectos en el intemperismo natural.

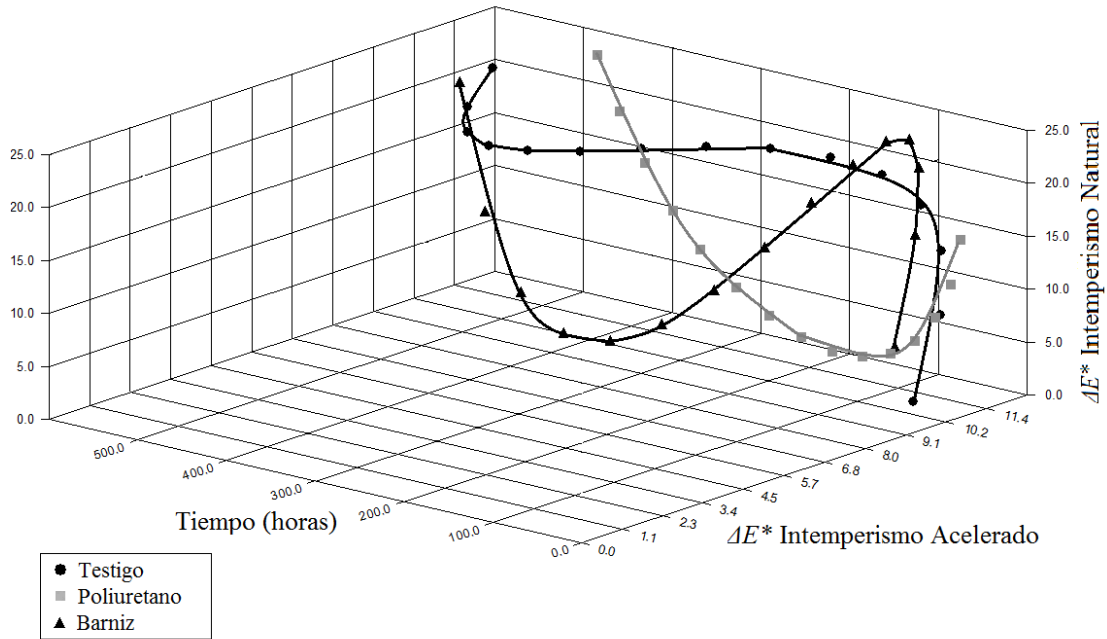
El índice de calidad de superficie también se puede predecir con el modelo $ICS_{IN} = x_1 + (x_2 / ICS_{IA}) + x_3 * t + x_4 * (t)^2 + x_5 * (t)^3$ el cual funciona con los datos de índice de calidad de superficie generados en intemperismo acelerado y el tiempo de exposición en horas, este modelo funciona como una excelente manera de predecir el comportamiento debido al alto coeficiente de determinación y bajo porcentaje de error determinados.

Recomendaciones

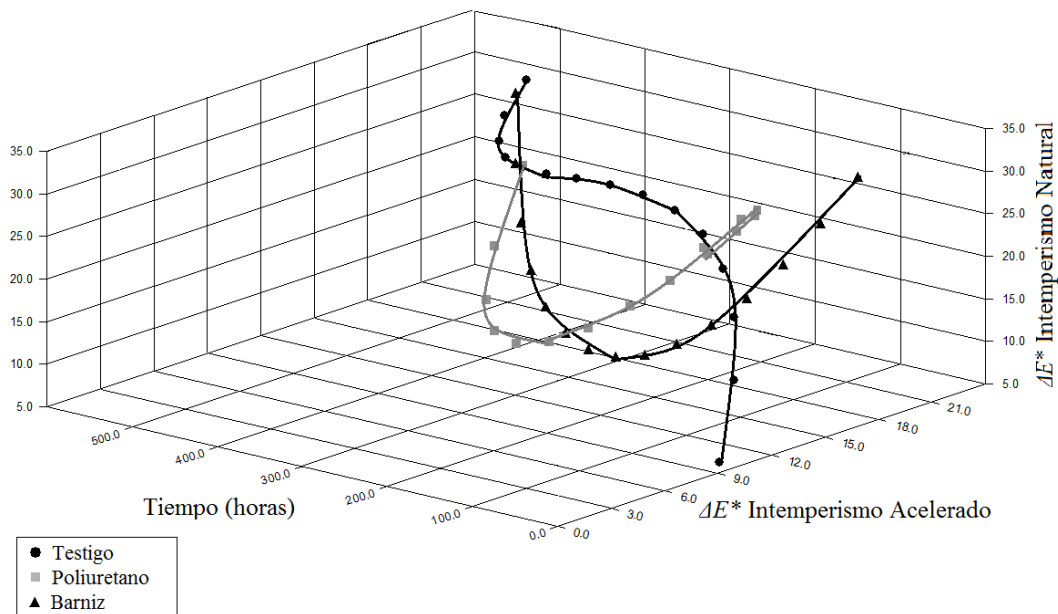
Se recomienda el desarrollo de este tipo de trabajos que consideren el uso de madera proveniente de plantaciones que hayan sido mejoradas genéticamente, ya que se puede empezar a correlacionar la calidad genética con la degradación, tomando ejemplo investigaciones desarrolladas en esta área como las de Bradbury *et al.* (2001a y b) con la especie *Acacia melanoxylon*, además se recomienda la evaluación de otros tipos de acabados como son la línea de poliéster o poliuretanos base agua que están iniciando su venta en el país. Otro aspecto es el desarrollar un ciclo en intemperismo acelerado que se llegue a parecer más a los datos históricos de cada región en análisis, con ello se podrá dar una mayor relación entre ambos intemperismos y con ello una mayor precisión. Finalmente desarrollar evaluaciones de color con periodos mayores de exposición en intemperismo acelerado, investigaciones como las de Williams (1999), Kataoka *et al.* (2004), recomiendan periodos entre 1500 a 3000 horas para poder tener comportamientos similares al intemperismo natural.

Se recomienda la evaluación en intemperismo natural otros ángulos a los caballetes debido a que un ángulo de 45° se ha formulado para zonas templadas y no se conoce su efecto en el trópico en específico Costa Rica que ronda entre una latitud de 8° a 10° Norte. Finalmente de lo cualitativo que es la norma ASTM 660 la cual se ve limitada en su aplicación por la experiencia u conocimiento de la persona que la aplica.

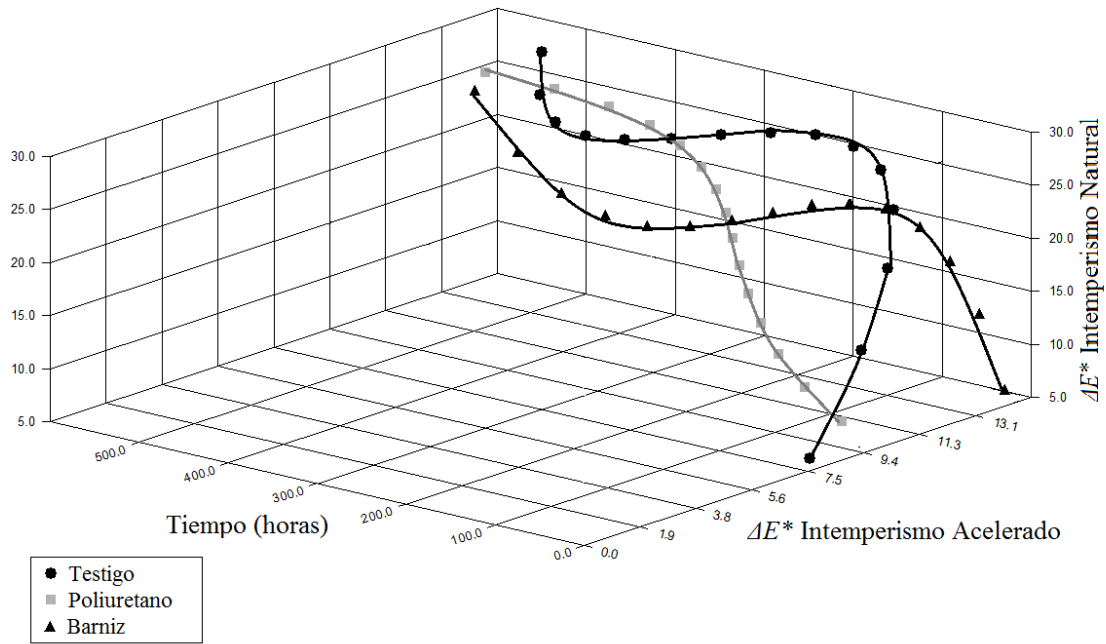
Anexos



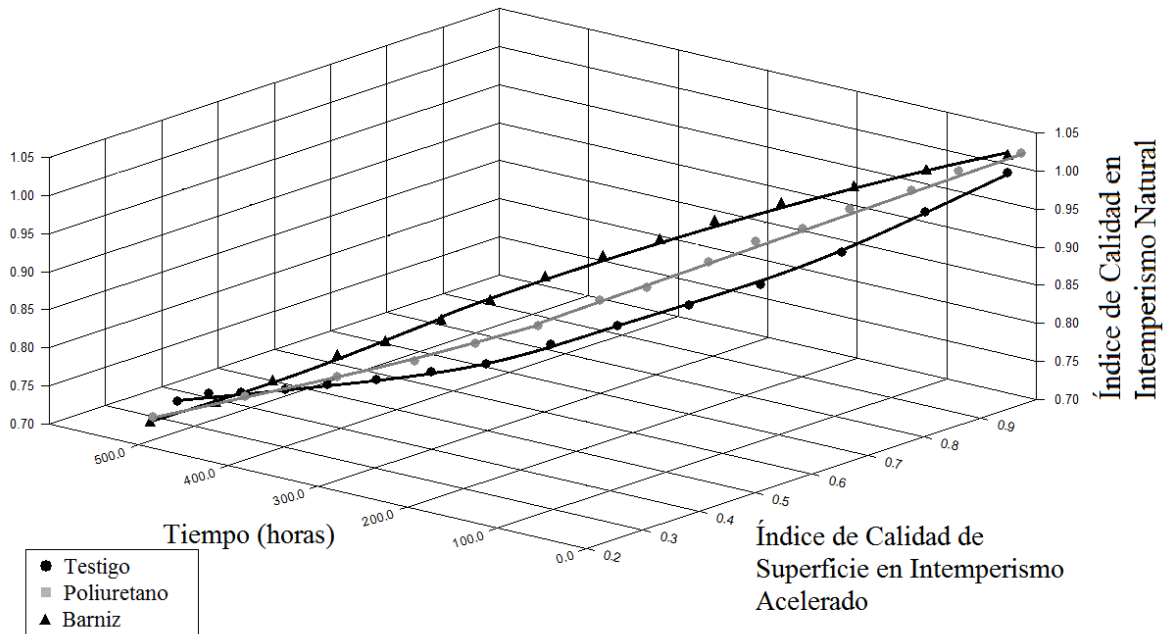
Anexo 1. Modelo tridimensional del ΔE^* en intemperismo natural a partir del ΔE^* en intemperismo acelerado y tiempo en horas para el duramen de *A. mangium* con tres acabados



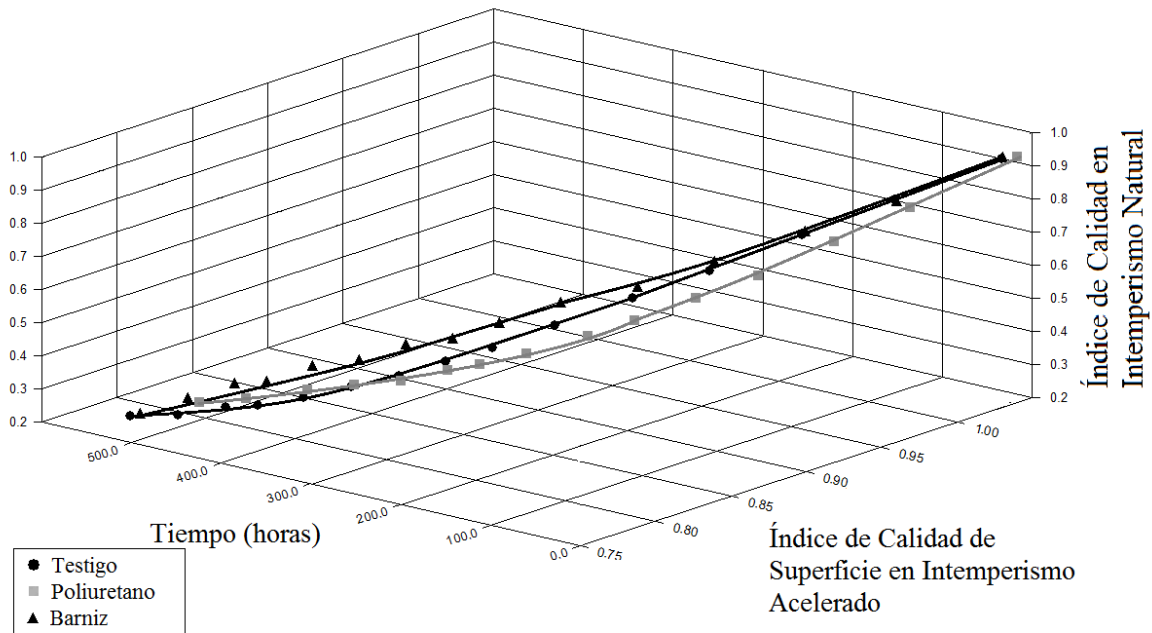
Anexo 2. Modelo tridimensional del ΔE^* en intemperismo natural a partir del ΔE^* en intemperismo acelerado y tiempo en horas para el duramen de *C. odorata* con tres acabados.



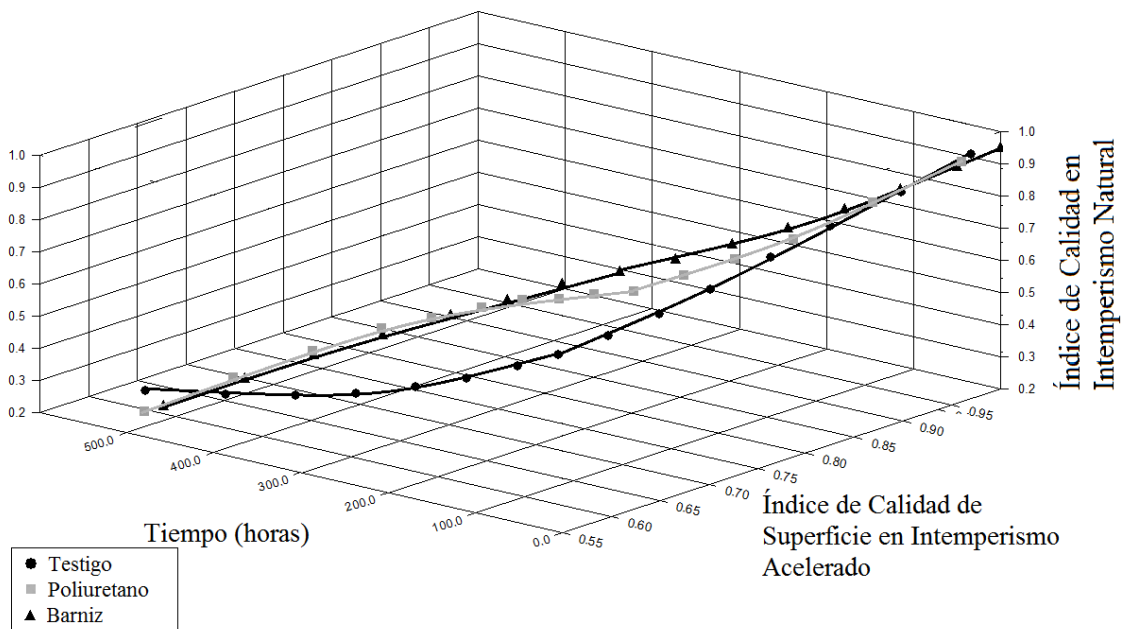
Anexo 3. Modelo tridimensional del ΔE^* en intemperismo natural a partir del ΔE^* en intemperismo acelerado y tiempo en horas para el duramen de *T. grandis* con tres acabados.



Anexo 4. Modelo tridimensional del Índice de calidad de superficie natural a partir del Índice de calidad de superficie en intemperismo acelerado y tiempo en horas para el duramen de *A. mangium* con tres acabados.



Anexo 5. Modelo tridimensional del Índice de calidad de superficie natural a partir del Índice de calidad de superficie en intemperismo acelerado y tiempo en horas para el duramen de *C. odorata* con tres acabados.



Anexo 6. Modelo tridimensional del Índice de calidad de superficie natural a partir del Índice de calidad de superficie en intemperismo acelerado y tiempo en horas para el duramen de *T. grandis* con tres acabados.

Bibliografía

- Ahajji, A; Diouf, PN; Aloui, F; Elbakali, I; Perrin, D; Merlin, A; George, B. 2009. Influence of heat Treatment on antioxidant properties and colour stability of beech and spruce wood and their extractives. *Wood Science Technology*. 43: 69–83.
- ASTM (American Society for Testing and Material, US). 2005a. Standard Test Method for Evaluating Degree of Checking of Exterior Paints (D 660-93). Book of Standards. Section 6. Vol 0.6.01. Pennsylvania, US. 224p.
- ASTM (American Society for Testing Material, US). 2005b. Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates (D 2244-02). Book of Standards. Section 6. Vol 0.6.01. Pennsylvania, US. 224p.
- ASTM (American Society for Testing and Material, US). 2005c. Standard practice for operating fluorescent light apparatus for UV exposure of nonmetallic material. (G 154-98). Book of Standards. Section 6. Vol 0.6.01. Pennsylvania, US. 224p.
- Barreto, C.; Pastorez, T. 2009. Resistance to artificial weathering of four tropical woods: The effect of the extractives. *Ciências Forestais*. 19(1): 23-30.
- Bradbury, GJ; Potts, BM; Beadle, CL. 2011. Quantifying phenotypic variation in wood colour in *Acacia melanoxylon* R.Br. *Forestry*. 83(2): 153-162.
- Bradbury, GJ; Potts, BM; Beadle, CL; Dutkowski, G; Hamilton, M. 2011. Genetic and environmental variation in heartwood colour of Australian blackwood (*Acacia melanoxylon* R.Br.). *Holzforschung*. 65: 349-359.
- Bulian, F; Graystone, JA. 2009. *Wood Coating: Theory and practice*. Amsterdam, NE, Elsevier. 320 p.
- Creemers, J; de Meijer, M; Zimmermann, T; Sell, J. 2002. Influence of climatic factors on the weathering of coated wood. *Holz als Roh-und Werkstoff*. 60: 411-420.

- Cui, W.; Kamdem, P.; Rypstra, T. 2004. Diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy (DRIFT) and color changes of artificial weathered wood. *Wood Fiber Science*. 36: 291-301.
- Dawson, BSW, Singh, AP; Kroese, HW; Schwitzer, MA; Gallagher, S; Riddiough, SJ; Wu, S. 2008. Enhancing exterior performance of clear coatings through photostabilization of wood. Part 2: coating and weathering performance. *Journal of Coatings Technology and Research*. 5 (2):207-219.
- de Meijer, M. 2001. Review on the durability of exterior coatings with reduced VOC-content. *Progress in Organic Coatings*. 43 217-225.
- de Meijer, M; Nienhuis, J. 2009. Influence of internal stress and extensibility on the exterior durability of wood coatings. *Progress in Organic Coatings*. 63:498–503.
- Deka, M; Humar, M; Kricej,GB; Petric, M. 2008. Effects of UV light irradiation on colour stability of thermally modified, copper ethanolamine treated and non-modified wood: EPR and DRIFT spectroscopic studies. *Wood Science Technology*. 42: 5–20.
- Evans, PD; Banks, WB. 1990. Degradation of wood surfaces by water. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 48: 159-163.
- Evans, PD; Urban, K; Chowdhury, JA. 2008. Surface checking of wood is increased by photodegradation caused by ultraviolet and visible light. *Wood Science Technology*. 42: 251–265.
- George, B; Suttel, E; Merlin, A; Deglise, X. 2005. Photodegradation and photostabilization of wood - The state of art. *Polymer Degradation and Stability*. 88:268-274.
- Ghost, SC; Militz, H; Mai, C. 2009. Natural weathering of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) boards modified with functionalized commercial silicone emulsions. *Bioresources*. 4(2): 659-673
- Hiltunen, E; Mononen, K; Alvila, L; Pakkanen, TT. 2008. Discolouration of birch wood: analysis of extractives from discoloured surface of vacuum-dried European white birch (*Betula pubesce*) board. *Wood Science Technology*. 42: 103–115.

- IMN (Instituto Meteorológico Nacional, CR). 2011. Estación automática del ITCR, Cartago. (En Línea). Consultado el 5 de abr. del 2011. Disponible en: http://www.imn.ac.cr/estaciones_auto/index.html.
- Janin, G, González, 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 Systems. *Maderas. Ciencia y tecnología*. 3(1):3-1.
- Jewitt, J. 2000. *Great wood finishes*. Taunton Press, New York, US. 350p.
- Kataoka, Y; Kiguchi, M; Evans, PD. 2004. Photodegradation depth profile and penetration of light in Japanese cedar earlywood (*Cryptomeria japonica* D. Don) exposed to artificial radiation. *Surface Coatings International Part B: Coatings Transactions*. 87(B3): 149-156.
- Kolb, J. 2008. *Systems in Timber Engineering Loadbearing Structures and Component Layers*. Berlín, DE. Birkhäuser Basel. 315p.
- Lambourne, R; Strive, TA. 2004. *Paint and surface coating: Theory and Practice*. Cambridge, UK, William Andrew Publishing. 784p.
- Lukmandaru, G; Ashitani, T; Takahashi, K. 2009. Color and chemical characterization of partial black-streaked heart- wood in teak (*Tectona grandis*). *Journal of Forest Research*. 20(4): 377-380.
- Miranda, I; Sousa, V; Pereira, H. 2011. Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor. *Wood Science Technology*. 56:123-133.
- Mononen, K; Alvila, L; Pakkanen, TT. 2002. CIEL*a*b* Measurements to Determine the Role of Felling Season, Log Storage and Kiln Drying on Coloration of Silver Birch. *Wood Scandian Journal of Forest Research*. 17: 179–191.
- Ncube, E; Meincken, M. 2010. Surface characteristics of coated soft- and hardwoods due to UV-B ageing. *Applied Surface Science* 256 (2010) 7504–7509.
- Nishino, Y; Jamin, G; Chaon, B; Détienne, P; Gril, J; Thibaut, B. 1998. Colorimetry of wood specimen from French Guiana. *Wood Science Technology*. 44:3-8.

- Oliveira, J; Monteiro, T; Pastore, F. 2007. Resistência ao intemperismo artificial de quatro madeiras tropicais: o efeito dos extrativos. *Ciencias Forestales*. 17 (1):17-23
- Oltean, L; Teischinger, A; Hamann, C. 2008. Wood surface discolouration due to simulated indoor sunlight exposure. *Holz Alz Roh und Werkstoff*. 66: 51–56.
- Ota, M; Ogata, H; Jono, Y; Hirota, K; Abe, K. 1997. Light-induced color changes of acetylated veneers of kiri (*Paulowniatomentosa Steud.*). *Mokuzai Gakkaishi*. 43(2):785–791
- Pandey, KK. 2005. Study of the effect of photo-irradiation on the surface chemistry of wood. *Polymer Degradation and Stability*. 90(1):9-20
- Petric, M; Kricej, B; Humar, M; Pavlic, M; Tomazic, M. 2004. Patination of cherry wood and spruce wood with ethanolamine and surface finishes. *Surface Coatings International Part B: Coatings Traactio*. 87(B3):195-201.
- Salazar, G; Salas, N. 2010. Precios de la madera en Costa Rica (Primer semestre 2009). (En Línea) Consultado el 20 de abr. 2011. Disponible en: <http://www.oficinaforestalcr.org>
- Schaller, C ; Rogez, D. 2007. New approaches in wood coating stabilization. *Journal of Coating Technologies Research*. 4(4): 401–409.
- Schmidt, O. 2006. *Wood and Tree Fungi Biology, Damage, Protection, and Use*. Berlín, DE, Springer Berlin Heidelberg. 336 p.
- Schnabel, T; Zimmer, B; Petutschnigg, AJ. 2009. On the modelling of colour changes of wood surfaces. *Journal Wood Products*. 67: 141-149.
- Sivrikaya, H; Hafizoglu, H; Yasav, A; Aydemir, D. 2010. Natural Weathering of Oak (*Quercus petrae*) and Chestnut (*Castanea sativa*) Coated with Various Finishes. *Color Research and application*. 36 (1): 1-24.
- Sotelo-Montes, C; Hernández, RE; Beaulieu, J; Weber, JC: 2008. Genetic variation in wood color and its correlation with tree growth and wood density of *Calycophyllum spruceanum* at an early age in the Peruvian Amazon. *New Forests*. 35:57–73.

- Saha, S; Kocaefe, D; Boluk, D; Pichette, A. 2010. Enhancing exterior durability of jack pine by photo-stabilization of acrylic Polyurethane coating using bark extract. Part1: Effect of UV on color change and ATR–FT-IR analysis. *Progress in Organic Coatings*. 70 (4): 376-382.
- Surmiński, J. 2007. *Wood Properties and Uses*. Eds. Tjoelker, MG; Boratyński, A; Bugada, W. Amsterdam, NE, Springer Netherlands. 315 p.
- Temiz, A; Terziev, N; Eikenes, M; Hafren, J. 2007. Effect of Accelerated weathering on surface chemistry of modified wood. *Applied Surface Science* 253: 5355–5362.
- Tolvaj, L; Mitsui, K. 2005. Light source dependence of the photodegradation of Wood. *Wood Science Technology*. 51:468–473.
- Tolvaj, L; Mitsui, K. 2010. Correlation between hue angle and lightness of light irradiated wood. *Polymer Degradation and Stability*. 95: 638-642.
- Valverde, JC. 2009. Efectos en el color de la madera con acabado de *Cedrela odorata* L. y *Carapa guianensis* Aubl. Expuesta a la intemperie. Kurú: *Revista Forestal*. 6(17): 1-8.
- Valverde, JC; Moya, R. 2010. Efectos de la intemperie en el color de dos acabados aplicados en madera de *Cedrela odorata* Y *Carapa guianensis*. *Maderas Ciencia y Tecnología*. 12(3):171-180.
- Williams, RS; Sotos, P; Feist, WC. 1999. Evaluation of several finishes on several weathered wood. *Journal of wood Coatings*. 71(895):97-102.
- Williams, RS; Jourdain, C; Daisey, G; Springate, RW. 2000. Wood properties affecting finish service life. *Journal of wood Coatings*. 72(902):35-42.
- Williams, RS; Feist, WC. 2001. Duration of wood preweathering: Effect on the service life of subsequently applied paint. *Journal of Wood Coatings*. 73(930):65-72.
- Williams, RS. 2005. Finishing of Wood. In: Willia, S. *Wood handbook In Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. US,CRC press. 200 p.