

# EVOLUCIÓN DEL COLOR Y DE LA APARICIÓN DE DEFECTOS EN LA MADERA DE *Eucalyptus globulus* EXPUESTA A INTEMPERISMO NATURAL

## EVOLUTION OF COLOR AND THE APPEARANCE OF DEFECTS IN *Eucalyptus globulus* WOOD EXPOSED TO NATURAL WEATHERING

**Karen Gabriela Moreno<sup>1,\*</sup>**

<https://orcid.org/0000-0002-2595-2775>

**Eleana María Spavento<sup>2</sup>**

<https://orcid.org/0000-0002-3810-8952>

**Silvia Estela Monteoliva<sup>3</sup>**

<https://orcid.org/0000-0002-8679-7633>

### RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó el comportamiento de la madera de *Eucalyptus globulus* sin preservar, expuesta a la intemperie durante un año en la ciudad de La Plata, Argentina. Se analizó la evolución del color y la presencia de defectos, y su relación con algunas variables climáticas y con el contenido de humedad de la madera. Se colocaron 54 muestras (2,5 cm x 12 cm x 50 cm) en un expositor exterior con inclinación de 45° (norte) y sobre ellas se determinó mensualmente color (CIELab\*), humedad y defectos. Una muestra sin exposición fue considerada testigo. Entre los 150-180 días de comenzar el ensayo, los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  alcanzaron valores cercanos al mínimo (49,22; -6,5; -1,90 respectivamente); al finalizar presentaron cambios significativos respecto a los valores iniciales ( $\Delta L^*=22,55$ ;  $\Delta a^*=5,41$ ;  $\Delta b^*=16,64$ ;  $\Delta E^*_{total}=29,10$ ) y al testigo. Los valores de radiación solar y precipitaciones no influyeron significativamente en el color mientras que la temperatura afectó al parámetro  $a^*$ . El contenido de humedad de la madera se correlacionó con la presencia de algunos defectos, pero no afectó al color. El intemperismo provocó pérdida del color natural, adquiriendo un tono grisáceo ( $a^*$  y  $b^*$  cercanos a 0=acromático y  $L^*=47,6$ ) y aumentó el agrietado, siendo los primeros 150 días de exposición claves en este proceso.

**Palabras claves:** Calidad de madera, CIELab\*, *Eucalyptus globulus*, fotodegradación, intemperismo.

### ABSTRACT

In this work, the behavior of *Eucalyptus globulus* unpreserved wood exposed outdoor for a year in La Plata city, Argentina, was evaluated. The evolution of color and defects presence were analyzed, and also their relationship with some climatic variables and the wood moisture content. Fifty-four samples (2.5 cm x 12 cm x 50 cm) were placed in an outdoor exhibitor with a 45° inclination (north), in which color (CIELab\*), moisture content and defects were determined monthly. A sample without outdoor exposure was considered as control. After 150-180 days starting the test, the values of  $L^*$ ,  $a^*$  and  $b^*$  reached values close to the minimum (49.22; -6.5; -1.90, respectively). At the end, the colorimetric parameters showed significant changes with respect to the initial values ( $\Delta L^*=22.55$ ;  $\Delta a^*=5.41$ ;  $\Delta b^*=16.64$ ;  $\Delta E^*_{total}=29.10$ ) and to the control. The values of solar

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ciencias Agrarias. Balcarce, Argentina.

<sup>2</sup>Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. LIMAD. La Plata, Argentina.

<sup>3</sup>Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. INFIVE-CONICET. La Plata, Argentina.

\*Corresponding author: karenmoreno@mdp.edu.ar

Received: 18.03.2021 Accepted: 07.02.2022

radiation and rainfall did not significantly influence the color, while the temperature affected the parameter  $a^*$ . The moisture content of wood correlated with the presence of some defects, but it was not correlated with the color. Weathering caused loss of natural color, acquiring a grayish tone ( $a^*$  and  $b^*$  close to 0 = achromatic and  $L^*=47.6$ ) and increasing the level of cracking; the first 150 days of exposure were key in this process.

**Keywords:** Wood quality, CIELab\*, *Eucalyptus globulus*, photodegradation, weathering.

## INTRODUCCIÓN

La madera es un material que puede ser utilizado con fines estructurales en muros, viguetas, cubiertas de madera, entre otros, como así también con fines no estructurales en muebles, carpintería, etc., pudiendo emplearse al interior o al exterior en contacto con agentes bióticos y/o abióticos de deterioro (Humar *et al.* 2019). Cuando la madera es expuesta al exterior, los factores climáticos, tales como la radiación solar, el agua, la temperatura y el viento, producen un desgaste sobre la superficie que provocan cambios químicos, físicos, mecánicos y estéticos, proceso denominado intemperismo. Estos cambios ocurren a nivel superficial durante el inicio de la meteorización, siendo la decoloración el primer aspecto evidente en este proceso (Turkoglu *et al.* 2015, Cui y Matsumura 2019).

La exposición al aire libre conduce a la despolimerización de la celulosa y a la pérdida de hemicelulosas y contenido de lignina (Evans *et al.* 1996). Ésta última, dada su alta absorción en la región ultravioleta-visible, es clave en el proceso de meteorización de la madera (George *et al.* 2005). En relación a esto, la presencia de agua líquida, como por ejemplo a modo de rocío, combinada con la radiación solar, puede generar un efecto “lupa”, provocando una mayor absorción de la radiación, y de esta manera aumentar la fotodegradación de la lignina (Rodríguez-Anda y Fuentes-Talavera 2003).

En una etapa posterior, el proceso de degradación/decoloración puede ser profundizado por la colonización de agentes biológicos, principalmente hongos xilófagos, cromógenos y mohos, los cuales afectan las propiedades físico-mecánicas, químicas y/o estéticas de la madera (Negrão *et al.* 2014).

Asimismo, durante el intemperismo natural se produce una pérdida de luminosidad ( $L^*$ ) y una disminución de los parámetros colorimétricos  $a^*$  (variabilidad de pigmentos rojo-verde) y  $b^*$  (variabilidad de los pigmentos amarillo-azul). Estos cambios se visualizan sobre el material como un agrisado de la superficie, siendo un fenómeno que se registra en muchas especies de gimnospermas y angiospermas (Turkoglu *et al.* 2015, Oberhofnerová *et al.* 2017, Davor *et al.* 2018, Griebeler *et al.* 2018, Cui y Matsumura 2019).

En este sentido, numerosos ensayos a campo de intemperismo natural han sido llevados a cabo a fin de predecir el comportamiento y vida útil en condiciones cercanas a las de servicio de diferentes especies madereras con/sin tratamientos de preservación (Brischke and Rapp 2008, Turkoglu *et al.* 2015, Oberhofnerová *et al.* 2017, Davor *et al.* 2018, Griebeler *et al.* 2018, Cui y Matsumura 2019). En este contexto, se han reportado algunos trabajos que han evaluado el intemperismo en madera de diferentes especies de *Eucalyptus* sin tratamiento preservante (Mattos *et al.* 2013, Cademartori *et al.* 2015 Avila-Delucis *et al.* 2016) sin embargo, con respecto a *Eucalyptus globulus*, hasta el momento no se han encontrado trabajos de intemperismo natural.

Si bien el uso de la madera de *E. globulus* es reconocido a nivel mundial y está relacionado mayormente a la industria celulósico-papelera, desde hace varias décadas se evidencia un interés creciente relacionado a usos sólidos tanto estructurales como no estructurales (Franke y Marto 2014, Belleville *et al.* 2016, Acuña *et al.* 2020). En este contexto, una de las características que resulta interesante estudiar es su comportamiento en aplicaciones de uso exterior.

Sin embargo, un aspecto a considerar en esta especie es la aparición de tensiones de crecimiento producidas durante el desarrollo del árbol y liberadas de forma repentina durante la corta, trozado y aserrado del rollizo. La liberación de estas tensiones genera en la madera defectos como deformaciones, grietas y/o rajaduras. Asimismo, durante un proceso de secado no controlado, esta madera es propensa a sufrir el colapso de sus fibras con la consecuente formación de grietas internas y superficiales (Touza-Vázquez 2001, Rozas *et al.* 2005).

Por su parte, las grietas y rajaduras pueden acrecentarse al exponer la madera a la intemperie, pudiendo también representar una vía de acceso de hongos xilófagos acelerando de este modo, el proceso de deterioro (Humar *et al.* 2019). La presencia de dichos defectos junto con las condiciones a las que la madera es expuesta (temperatura y humedad relativa) determinarán la capacidad de los hongos para degradarla (Cademartori *et*

*al.* 2015).

En términos generales, el cambio de color y la vida útil de la madera expuesta al exterior depende de una variedad de factores entre los que se pueden mencionar: la especie maderera, la protección aplicada (química o por diseño), las condiciones de exposición (orientación) y las condiciones climáticas locales (microclima) (Humar *et al.* 2019). Todo esto influye sobre el contenido de humedad y sobre las propiedades generales de la madera para su uso exterior (Lovaglio *et al.* 2019).

De acuerdo con esto, el objetivo del presente trabajo fue estudiar el comportamiento de la madera de *Eucalyptus globulus* sin preservar, expuesta a la intemperie durante un año en la ciudad de La Plata, Argentina, evaluando la evolución del color y de algunos defectos, y su relación con variables climáticas y con el contenido de humedad de la madera.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Material leñoso

El material experimental se obtuvo de la especie *Eucalyptus globulus* procedente de 10 parcelas permanentes de muestreo pertenecientes a plantaciones comerciales ubicadas en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Se seleccionaron al azar 23 árboles de entre 10-15 años. El material fue acondicionado durante un año en depósito cubierto y a temperatura ambiente para lograr su secado natural hasta humedad de equilibrio higroscópico. Las probetas sobre las que se evaluó el efecto del intemperismo natural se extrajeron de la troza basal de los árboles (mínimo dos probetas/árbol) sumando un total de 55 probetas de 2,5 cm x 12 cm x 50 cm cepilladas en sus caras, de las cuales 54 fueron expuestas a intemperismo y una fue empleada como testigo sin exposición. Cabe destacar que, dado el material disponible y la imposibilidad de obtener probetas libres de defectos, se realizó un registro de defectos previo al ensayo de intemperismo, que se consideró como estado inicial del material.

### Ensayo de intemperismo natural

El ensayo fue realizado en la ciudad de La Plata, Argentina (34° 59" S, 57° 59" O, 45 msnm). Las probetas sin preservar fueron colocadas en bastidores de madera durable; éstos fueron ubicados en un expositor exterior metálico con inclinación de 45°, orientado hacia el norte geográfico durante un año (junio 2018 a mayo 2019, ambos inclusive). Los valores mensuales de temperaturas, precipitación, humedad relativa y radiación solar del sitio de ensayo durante el tiempo de exposición se resumen en la Tabla 1 (UNLP-FCyF 2018-2019). La temperatura de rocío ( $Tr$ ) fue calculada según la siguiente Ecuación 1.

$$Tr = T + 35 \log \left( \frac{HR}{100} \right) \quad (1)$$

Donde:

Tr: punto de rocío medio (°C).

T: temperatura media del aire (°C).

HR: humedad relativa del aire (%).

**Tabla 1:** Condiciones climáticas durante el período de exposición.

Mes	Temperatura media °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C	Temperatura de rocío °C*	Radiación solar W/m <sup>2</sup>	Precipitación mm total	Humedad Relativa %
Junio 18	9,1	14,3	4	6,09	2253,4	7,6	82
Julio 18	9,2	12,9	5,9	6,92	1837,03	126,4	86
Agosto 18	10,4	15,5	5,4	7	3196,8	45,4	80
Sep. 18	15,1	20,2	10,7	11,70	3692,4	124	80
Oct. 18	15,6	21,2	9,6	11,05	5333,8	10,6	74
Nov. 18	19,5	25,3	13,8	14,7	6081,3	128	73
Dic. 18	20,5	26,2	14,8	15,7	6811,1	227,8	73
Ene. 19	23,3	28,4	18,4	18,92	6187,2	49,8	75
Feb. 19	21,8	27,9	15,2	16,79	6450,2	116,6	72
Marzo 19	19	24,7	13,5	15,04	5016	54,8	77
Abril 19	16,5	22,9	10,8	13,10	3808,3	61	80
Mayo 19	13,6	18,9	8,6	10,95	2664,2	53	84

Los datos meteorológicos se registraron con el modelo Davis Advantage Pro2, ubicada: lat 34°59' S -long 57°59' W de G -a.s.n.m. 45 m y procesados por el Ing. Agr. H. Martin Pardi de la sección agrometeorología dependiente de la Estación Experimental "Ing. Agr. Julio Hirschhorn" y la cátedra de Climatología y Fenología Agrícola de la FCAyF, U.N.L.P."

\* La temperatura de rocío fue calculada según la Ecuación 1.

### Evaluación de color, contenido de humedad y defectos

Sobre la totalidad de las probetas se midieron mensualmente los siguientes parámetros: defectos, humedad de la madera y color. Los defectos considerados fueron grietas y presencia/ausencia de signos de degradación (pudrición y manchas), los cuales fueron identificados y numerados sobre las tablas, con en el propósito de realizar un registro independiente de evolución de cada uno de ellos. Para el caso de las grietas, se registró número, longitud y ancho máximo de cada una de ellas con regla milimetrada. Se consideraron "microgrietas" a las grietas superficiales < 1mm de ancho. En relación a las manchas y podredumbres, se registró su presencia/ausencia. El contenido de humedad de la madera se determinó con un xilohigrómetro de resistencia (Hydromette HT 85-GANN).

Para la evaluación del color se utilizó el método CIELab\* (2007). En este sistema colorimétrico el parámetro  $L^*$  se denomina luminosidad e indica el tono de gris dentro de una escala negro-blanco, numéricamente demarcada entre 0 (negro) y 100 (blanco). Los parámetros  $a^*$  y  $b^*$  son las coordenadas cromáticas, las cuales dentro de una escala de 0 a 60 indican la variabilidad de los pigmentos rojo, verde, amarillo y azul, definidas por las variables  $+a^*$ ,  $-a^*$ ,  $+b^*$  y  $-b^*$ , respectivamente. Para la medición de los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  se realizó una única determinación mensual por tabla con espectrofotómetro (Modelo BYK-Gardner GmbH n° 115772) siempre en el mismo lugar, el cual fue identificado en la tabla con una marca desde el inicio del ensayo. Se estableció un promedio mensual basado en 54 mediciones para cada parámetro de medición de color. Los valores de diferencia de color ( $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  y  $\Delta b^*$ ) se calcularon bimensualmente, y a través de ellos se determinó el parámetro  $\Delta E^*$  el cual expresa la diferencia total de color y se calcula según la siguiente Ecuación 2.

$$\Delta E^* = \left[ (\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

Un  $\Delta E^*$  bajo indica que el color no se alteró a simple vista o se mantuvo igual, mientras que un  $\Delta E^*$  alto indica un cambio de color evidente. Cui *et al.* (2004) establecen 5 niveles de cambios en el color respecto a la percepción del ojo humano: (I) cuando  $\Delta E^*$  varía de 0 a 1,5 el cambio de color no es catalogado como apreciable, (II) cuando  $\Delta E^*$  se encuentra entre 1,5 a 3 el cambio de color es apenas apreciable en la superficie, (III) cuando el rango varía de 3 a 6 el cambio es apreciable, (IV) cuando  $\Delta E^*$  varía de 6 a 12 el cambio es muy notable, (V) cuando  $\Delta E^*$  es mayor a 12 el cambio de color es total. Dicho criterio clasificatorio fue considerado como referencial en el presente trabajo.

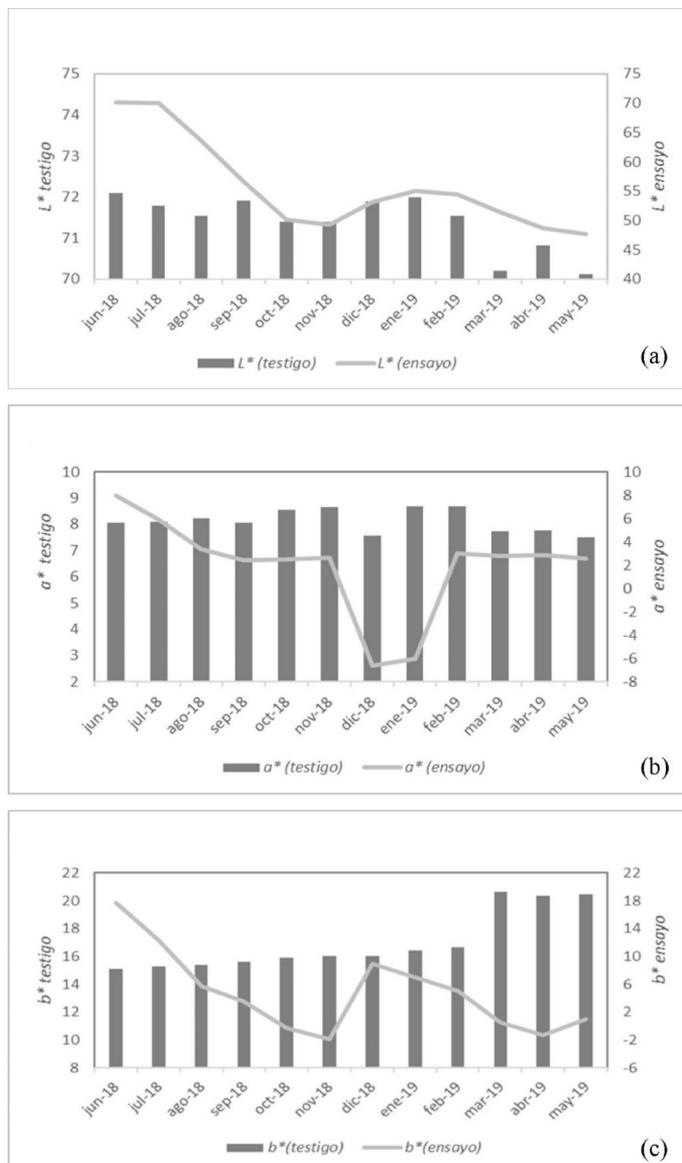
## Análisis estadístico

La evaluación estadística se realizó con el software Stat Statistica 2011. Se efectuó un análisis descriptivo de cada variable y se constataron los supuestos de normalidad y homocedasticidad dentro de cada grupo analizado (color, humedad, variables climáticas y defectos). Se desarrollaron pruebas de comparación acordes a la estructura de datos: test paramétricos cuando se constataron ambos supuestos estadísticos, test no paramétricos cuando no se constató la normalidad, pero sí la homocedasticidad. Se analizaron correlaciones (de Pearson o de Spearman) para explicar la relación entre las variables climáticas y los parámetros de color, las variables climáticas y el contenido de humedad, y el contenido de humedad y los defectos de la madera.

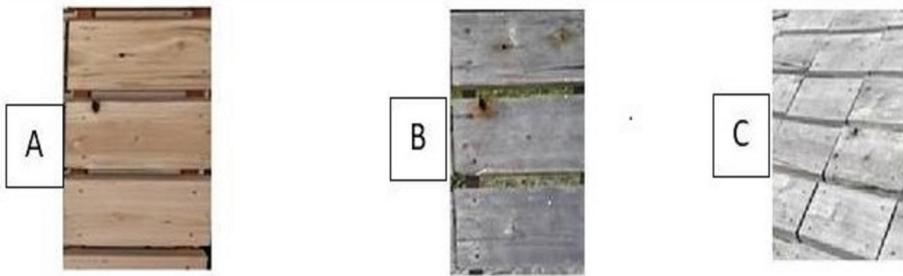
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Evolución de color

Los parámetros colorimétricos de *E. globulus* luego de 1 año de exposición presentaron cambios significativos ( $p < 0,05$ ) respecto de los valores testigo (Figura 1a, Figura 1b y Figura 1c).



**Figura 1:** (a), (b) y (c) Indican la evolución mensual de color  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , respectivamente en tablas de *Eucalyptus globulus* expuestas a intemperismo y en el material testigo.



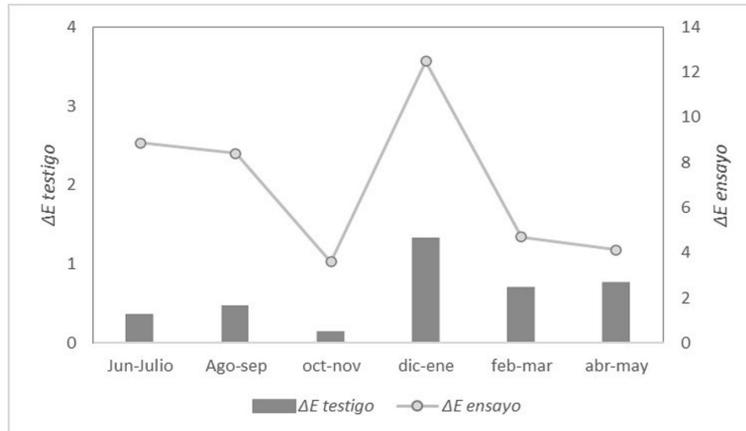
**Figura 2:** Apariencia de la madera expuesta a la intemperie: A) inicio del ensayo, junio 2018, B) verano, diciembre 2018, C) Fin del ensayo, mayo 2019.

En el material intemperizado al principio del ensayo (junio=invierno), los valores de  $L^*$  ensayo fueron los más altos (70,22, Figura 1a y Figura 2a), disminuyendo significativamente ( $p=0,0000$ ) a partir del mes de agosto hasta el mes de octubre (50,13-agrisado), alcanzando su segundo valor mínimo (49,22) en noviembre (Figura 1a). Posteriormente estos valores aumentaron significativamente ( $p=0,0000$ ) en los meses de verano de máxima insolación (diciembre-enero-febrero  $L^*=53,21; 55$  y  $54,41$ , respectivamente) correspondiéndose con un proceso de decoloración (Figura 2b). A partir de febrero, comenzó un descenso significativo ( $p=0,0391$ ) hasta el valor mínimo de 47,67 a fines de mayo 2019 (Figura 1a y Figura 2c). Los valores de descenso total de  $L^*$  luego de un año de exposición fueron de  $\Delta L^*=22,55$ . En cuanto al material testigo, los valores de  $L^*$  oscilaron entre 72-70 desde el inicio hasta el final del ensayo, presentándose el valor más bajo en el mes de mayo (70,13) (Figura 1a). Ninguno de los cambios mencionados fue apreciable a simple vista (Cui *et al.* 2004). Los valores variaron en un rango entre 72,09 a 70,13 ( $\Delta L^*=1,96$ ).

Los valores del parámetro  $a^*$  ensayo, al inicio de la exposición (junio=invierno) en las probetas intemperizadas, fueron los más altos, los cuales se corresponden con su coloración rosada (8,05) (Figura 1b y Figura 2a). A partir de dicho momento se observó una disminución significativa ( $p=0,0000$ ) hasta el mes de septiembre (2,4). Desde el mes de septiembre hasta noviembre los valores se estabilizaron. A partir de diciembre se produjo una segunda disminución significativa ( $p=0,0000$ ) hasta alcanzar valores negativos (-6,5 y -6) en diciembre y enero respectivamente, evidenciando así un cambio de coloración con la consecuente pérdida de pigmentación rojiza de las muestras (Figura 1b y Figura 2b). Durante el mes de febrero este parámetro aumentó nuevamente, estabilizándose en valores intermedios próximos a 2,6 (tendiendo a acromático=gris, Figura 2c) hacia el final del ensayo. La diferencia de magnitud de este parámetro entre el inicio y la finalización del ensayo fue de  $\Delta a^*=5,41$ . En cambio, los valores del parámetro  $a^*$  en la probeta testigo variaron en un rango entre 8,05 a 7,49 ( $\Delta a^*=0,56$ ), correspondiendo los mayores valores a los meses de primavera (8,64 noviembre) y verano (8,69 febrero), y el más bajo al finalizar el ensayo (7,49 mayo). Ninguno de esos cambios fue apreciable a simple vista (Cui *et al.* 2004). El parámetro  $b^*$  ensayo, al inicio de la exposición (junio=invierno), también presentó el valor más alto (17,69), luego disminuyó significativamente ( $p=0,0000$ ) durante los primeros meses virando hacia tonos más acromáticos (gris=valores cercanos a 0) hasta el mes de noviembre, que alcanzó su valor mínimo (-1,90) observándose en las muestras, una tendencia a perder su pigmentación amarilla (Figura 1c). En los meses de verano de máxima insolación, diciembre y enero,  $b^*$  aumentó significativamente ( $p=0,0000$ ) hasta alcanzar valores de 8,9-7. A partir de febrero comenzó nuevamente un descenso significativo ( $p=0,0000$ ) hasta valores cercanos al mínimo (-1,28) en el mes de abril. El cambio de  $b^*$  fue 3 veces más alto que el de  $a^*$  luego de un año de exposición ( $\Delta b^*=16,64$ ). En la probeta testigo,  $b^*$  aumentó muy gradualmente de invierno (junio) a verano (febrero); durante el mes de marzo se registró un aumento notorio (20,61) que se mantuvo a lo largo del otoño, registrándose hacia el final del ensayo, los valores más altos, virando hacia tonos más amarillos (20,44). Los valores variaron en un rango entre 15,12 a 20,44. El valor de cambio de este parámetro fue el más alto en referencia al material testigo, siendo apreciable a simple vista (Cui *et al.* 2004,  $\Delta b^*=5,32$ ).

Los parámetros de color descriptos anteriormente se agruparon en un único índice que interpreta, en forma conjunta, los cambios de color entre dos meses consecutivos denominado  $\Delta E^*$  (Ecuación 2). El  $\Delta E^*$  de las probetas intemperizadas ( $\Delta E^*$  ensayo, Figura 3) disminuyó significativamente y en forma apreciable a simple vista, hasta noviembre (primavera) de manera similar a los cambios ocasionados en los parámetros  $L^*$  y  $b^*$  (Figura 1a y Figura 1c). Por lo tanto, los cambios producidos fundamentalmente en la luminosidad, con el agrisado y el viraje hacia los tonos más oscuros azulados (valores negativos de  $b^*$ ), fueron los responsables de

este descenso en los valores de color. Posteriormente, pasado el mes de noviembre, el  $\Delta E^*$  ensayo, aumentó significativamente hasta un valor de 12,48 en diciembre-enero. En los meses de febrero-marzo los valores descendieron significativamente y luego se estabilizaron en torno a un valor de 4, sin diferencias significativas. Todos estos cambios fueron apreciables a simple vista (Cui *et al.* 2004).



**Figura 3:** Evolución bimensual de  $\Delta E^*$  durante el período de exposición en las tablas intemperizadas y testigo.

Durante los meses de verano la probeta testigo sufrió un leve cambio de color ( $\Delta E$  testigo, Figura 3) apenas apreciable a simple vista (Cui *et al.* 2004,  $\Delta E$  menor a 3). Este leve cambio se debe al aumento del parámetro  $L^*$  y a la disminución de  $a^*$  a partir del mes de diciembre, reflejando, aunque con menor magnitud, la tendencia hallada en las probetas intemperizadas.

La variación de color neta ( $\Delta E^*_{total}$ ) durante todo el periodo de exposición del material fue de 29,10, con lo cual las maderas intemperizadas al finalizar el ensayo experimentaron un cambio total de color (Figura 2c). En el caso de la madera testigo el valor de  $\Delta E^*_{total}$  fue de 5,7, lo que indicó que si bien el cambio de color fue leve, éste fue apreciable a simple vista.

De acuerdo con los valores medios mensuales de las variables climáticas registradas durante este ensayo (UNLP-FCyF 2018-2019), la radiación solar y las precipitaciones no influyeron significativamente en ningún parámetro colorimétrico según las correlaciones de Spearman ( $p > 0,05$ ). Contrariamente, la temperatura media mensual y la temperatura de rocío, afectaron negativamente al parámetro  $a^*$  ( $r = -0,57$ ,  $p < 0,1$  y  $r = -0,61$ ,  $p < 0,05$  respectivamente). La tendencia indica que, a medida que aumentó la temperatura, la madera fue perdiendo su color rosado (valores más bajo de  $a^*$ ).

Asimismo, la radiación solar, la temperatura media mensual y la temperatura de rocío correlacionaron negativa y significativamente con el contenido de humedad de la madera ( $r = -0,72$ ,  $r = -0,63$  y  $r = -0,68$  respectivamente,  $p < 0,05$ ) mientras que la humedad relativa del aire se correlacionó positivamente ( $r = 0,75$ ,  $p < 0,05$ ). Tal como era esperable, se registraron los valores más altos de contenido de humedad de la madera durante los meses invernales, julio a septiembre (entre 21,1 %-18,9 %), meses de mayor humedad relativa y menores temperaturas; mientras que los valores más bajos se registraron en los meses estivales, diciembre a febrero (entre 12,6 %-15 %, respectivamente), meses de menor humedad relativa y mayores temperaturas. Sin embargo, la variación en el contenido de humedad de la madera no influyó directamente sobre el cambio de color, ya que esta variable no se correlacionó significativamente con ninguno de los parámetros colorimétricos ( $p > 0,05$ ).

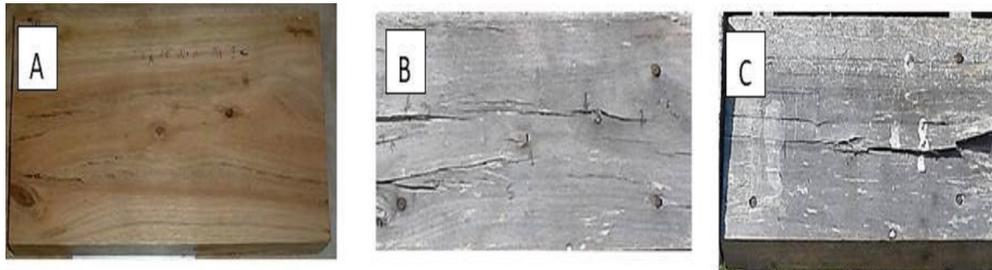
### Evaluación de defectos

Tal como se comentó anteriormente, al inicio del ensayo algunas probetas presentaron defectos que fueron registrados previamente a la exposición (Figura 4a). En este sentido, las grietas superficiales menores a 1 mm de ancho (microgrietas), fueron las que se hallaban presentes en mayor proporción. Al finalizar el ensayo, el 37 % de las tablas presentaron microgrietas (Figura 4b), el 18,5 % levantamientos (Figura 4c) y el 6 % algún signo de degradación por hongos (manchadores y xilófagos). El ancho máximo de grieta más frecuente después de la exposición, estuvo en el rango de 1-4 mm. El número medio de grietas totales por tabla antes de la exposición fue de 2,94 ( $\pm 1,8$ ), y la longitud media total de grietas fue de 53,5 mm ( $\pm 35$ ), mientras que al finalizar el ensayo estos valores aumentaron a 4,85 ( $\pm 1,80$ ) y 109,5 mm ( $\pm 27$ ) respectivamente. De acuerdo con esto, la

exposición de la madera al exterior incrementó el número y longitud de las grietas por tabla.

Se observó una relación negativa entre el contenido de humedad de la madera, y el aumento en número ( $r = -0,79$ ,  $p < 0,05$ ) y longitud de grietas ( $r = -0,69$ ,  $p < 0,05$ ). Esto fue debido principalmente a los cambios en el contenido de humedad de la madera durante los primeros 120 días de exposición (entre 21 %=julio y 15 %=octubre), con lo cual, a medida que el contenido de la humedad de la madera disminuyó, el número de grietas y/o su longitud, aumentó.

En cuanto a los signos de degradación (manchas o podredumbres) durante el ensayo, su porcentaje de aparición/presencia fue muy bajo. En la primera etapa el número de tablas afectadas fue del 2 %, aumentando a 4 % acontecidos los 120 días y a 6 % transcurridos 240 días de exposición. Asimismo, la probeta testigo no presentó grietas ni signos de degradación durante el periodo del ensayo.



**Figura 4:** Evolución de defectos en una misma tabla: A) inicio del ensayo, B) finalización del ensayo, C) tabla con levantamiento en extremo derecho y microgrietas en toda la superficie. Las grietas presentes al inicio del ensayo tuvieron una evolución en longitud y espesor.

En términos generales y de acuerdo a la bibliografía consultada, existen pocos trabajos que evalúen el comportamiento de la madera de *Eucalyptus* spp. sin preservar frente a la acción del intemperismo natural. Cademartori *et al.* (2015) analizaron madera de 3 especies: *E. saligna*, *E. cloeziana* y *E. grandis* expuestas a intemperismo natural (con orientación sur) en un sitio en el SE de Brasil, realizando muestreos cada 120 días entre marzo 2013 y marzo 2014. Por su parte, Avila-Delucis *et al.* (2016) realizaron la evaluación de intemperismo en *E. tereticornis* y *Corymbia citriodora* en 3 sitios contrastantes en Brasil, con muestreos cada 45 días, pero sin especificar la estación del año al comienzo del ensayo. En coincidencia con nuestro trabajo, estos autores indicaron una primera etapa en donde las maderas experimentaron una decoloración gradual, observando una disminución de los niveles de  $L^*$  (16 % al 30 %), seguida por una segunda etapa donde los niveles de  $L^*$  se estabilizaron a partir de los 240 días (Cademartori *et al.* 2015) y de los 225 días (Avila-Delucis *et al.* 2016). Sin embargo, las diferencias metodológicas de estos antecedentes (estación del año, clima predominante de exposición y tiempos entre muestreos) no permiten hacer una comparación con la evolución mensual de los resultados hallados en el presente trabajo. De acuerdo con esto, los valores finales de  $L^*$  dependerán de la especie (Turkoglu *et al.* 2015, Oberhofnerová *et al.* 2017, Davor *et al.* 2018, Griebeler *et al.* 2018, Cui y Matsumura 2019) y del tiempo y lugar de exposición.

En cuanto a los parámetros  $a^*$  y  $b^*$ , Avila-Delucis *et al.* (2016) y Cademartori *et al.* (2015) también reportaron la pérdida de tonalidad de rojo y amarillo hasta valores próximos a 0, en función del tiempo de exposición. Otros trabajos en distintas especies de angiospermas indicaron diferentes patrones de incrementos o disminuciones de estos parámetros a lo largo del proceso de meteorización, pero no pueden compararse directamente debido a las diferencias de especies y metodologías empleadas (Oberhofnerová *et al.* 2017, Ozgenc *et al.* 2012, Turkoglu *et al.* 2015). Sin embargo, la tendencia general que muestran estos parámetros en nuestro estudio, donde al finalizar el periodo de exposición se obtuvieron valores cercanos a cero (acromático) tornándose la madera de color gris, es coincidente con lo hallado por otros autores tanto para gimnospermas como para angiospermas (Davor *et al.* 2018, Cui y Matsumura 2019).

El cambio total de color hallado en nuestro trabajo, evaluado con el parámetro  $\Delta E^*_{total}$  (29,10), coincide con los valores registrados por varios autores para distintas especies durante un año de exposición. Cademartori *et al.* (2015) reportaron valores de  $\Delta E^*_{total} = 24,39$  a 25,70 para las tres especies de *Eucalyptus* analizadas. Por su parte, Oberhofnerová *et al.* (2017) registraron un rango de valores de  $\Delta E^*_{total}$  de 23 a 34,1

para *Quercus robur* y para *Picea abies*, respectivamente. En relación a esto, y a otros antecedentes bibliográficos, se puede inferir que la primera etapa de degradación de la madera está relacionada con reacciones de foto-oxidación y despolimerización de sustancias cromóforas presentes en la lignina y en los compuestos extraíbles (compuestos fenólicos y terpenos) (Hon 2001, Evans *et al.* 2002, Pandey 2005, Cui y Matsumura 2019), y a la posterior lixiviación del material degradado por la acción del intemperismo natural (lluvias, humedad y viento) (Sudiyani *et al.* 2003, Chang *et al.* 2010).

Los valores obtenidos para todos los parámetros colorimétricos en la probeta testigo coinciden con el rango de valores testigo informados por algunos autores en sus estudios de cambios de coloración en madera de *E. globulus* termotrada. En este sentido, Gullón-Estévez y González-Muñoz (2008), y Griebeler *et al.* (2018) informaron rangos de valores de  $L^*=55-75$ ,  $a^*=7,4-8,5$  y  $b^*=15,7-20,8$  en las probetas sin termotratada (control), considerando a la madera de esta especie de color clara con tonos amarillentos y algo rosados.

En relación a los defectos, Cademartori *et al.* (2015) reportaron para madera de *E. saligna*, *E. grandis* y *E. cloeziana*, la aparición de microgrietas después de 120 días de exposición y un incremento hasta los 240 días, para mantenerse constante hasta el momento de finalización del ensayo (360 días). Sin embargo, estos autores no presentan resultados cuantitativos. Oberhofnerova *et al.* (2017) indicaron, también de manera cualitativa, que las muestras de distintas especies de gimnospermas y angiospermas evaluadas después de 180 días de exposición, mostraron numerosas grietas en dirección de la fibra. Como se mencionó anteriormente, además de la influencia de estos defectos *per-se*, su presencia puede ocasionar el ingreso de agentes bióticos, en particular, hongos xilófagos, que aceleran el proceso de deterioro (Humar *et al.* 2019). En este sentido, los defectos iniciales en el material ensayado podrían ir en detrimento de nuestros resultados. No obstante, durante el ensayo, el porcentaje de tablas afectadas con algún signo de degradación (manchas o podredumbres) representó valores muy bajos (2-6 %). Cademartori *et al.* (2015) indicaron que la aparición de manchas y microgrietas en la superficie de la madera de las tres especies de eucalipto evaluadas, estuvo determinada por los niveles de temperatura, humedad y oxidación a la que fueron expuestas las maderas. Oberhofnerova *et al.* (2017) reportaron crecimiento de moho en muestras de otras especies latifoliadas (*Acer pseudoplatanus*, *Populus sp* y *Alnus glutinosa*), luego 120 días de exposición.

De acuerdo con los resultados hallados, el comportamiento de la madera de *Eucalyptus globulus* expuesta a intemperismo evolucionó según las tendencias indicadas en la bibliografía para otras especies, presentando variaciones en su apariencia superficial de color y en la evolución de defectos de acuerdo a las diferentes variables climáticas analizadas y a la variación en su contenido de humedad.

## CONCLUSIONES

La madera de *Eucalyptus globulus* procedente de la provincia de Buenos Aires, Argentina, sin preservar y expuesta a la intemperie durante un año en la ciudad de La Plata, cambia significativamente su apariencia superficial, principalmente desde los estadíos iniciales hasta los 150 días de exposición, periodo en que el deterioro es más evidente. Dicha madera pierde su color natural adquiriendo un tono grisáceo ( $a^*$  y  $b^*$  cercanos a 0=acromático y valores bajos de  $L^*$ ) y aumentando el nivel de agrietado y, en menor medida, la aparición de otros defectos (manchas y podredumbre). Al finalizar el ensayo los parámetros colorimétricos presentaron cambios significativos, y apreciables a simple vista, respecto del testigo, siendo su variación de color neta ( $\Delta E^*_{total}$ ) de 29,10.

Los valores de radiación solar y precipitaciones registrados durante el presente estudio no influyeron significativamente en los parámetros colorímetros, mientras que el aumento de la temperatura media mensual y la temperatura de rocío afectó negativamente al parámetro  $a^*$ . El contenido de humedad de la madera se correlacionó negativamente con la presencia de grietas (en número y longitud) pero no se correlacionó con los parámetros colorimétricos. La incidencia de deterioro evaluado a través de la presencia de hongos cromógenos o xilófagos, en función del contenido de humedad, fue muy baja (6 %).

En pos de generar un conocimiento más profundo en relación a la influencia de las variables climáticas sobre los procesos de degradación de esta madera, resulta necesario realizar nuevos ensayos que contemplen otros sitios con distintas condiciones (radiación, precipitaciones y temperaturas) a las evaluadas en este trabajo.

## AGRADECIMIENTOS

Al Mg. Sc. Ing. Ftal. Gabriel Keil por su valiosa ayuda en el montaje de las muestras para el ensayo de intemperismo y a la Ing. Ftal. Carla Taraborelli por su colaboración en la determinación de algunos parámetros cualitativos y colorimétricos.

## REFERENCIAS

**Acuña, L.; Sepliansky, F.; Spavento, F.; Martínez R.; Balmori, J. 2020.** Modelling of Impact Falling Ball Test Response on Solid and Engineered Wood Flooring of Two *Eucalyptus* Species. *Forests* 11(9): 933. <https://doi.org/10.3390/f11090933>

**Avila-Delucis, R.; Herrera Diaz, R.; Labidi, J.; Gatto, D. 2016.** Color of two eucalypts woods exposed to natural weathering in three different environments. *Maderas- Cienc Tecnol* 18(1): 133-142. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000014>

**Belleville, B.; Ashley, P.; Ozarska, B. 2016.** Wood machining properties of Australian plantation-grown eucalypts. *Maderas- Cienc Tecnol* 18(4): 677-688. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000059>

**Brischke, C.; Rapp, A. 2008.** Dose-response relationships between wood moisture content, wood temperature and fungal decay determined for 23 European field test sites. *Maderas- Cienc Tecnol* 42(6): 507-518. <https://doi.org/10.1007/s00226-008-0191-8>

**Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. UNLP- FCAYF. 2018-2019.** Boletín Agrometeorológico Mensual Climatología y Fenología Agrícola. Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales: La Plata, Argentina. <https://www.agro.unlp.edu.ar/institucional/boletin-estacion-experimental-jh>

**Cademartori, P.; Missio, L.; Mattos, B.; Gatto, D. 2015.** Natural weathering performance of three fast-growing eucalypt wood. *Maderas- Cienc Tecnol* 17(4): 799-808. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000069>

**Chang, T.; Chang, H.; Wu, C.; Lin, H.; Chang, S. 2010.** Stabilizing effect of extractives on the photo-oxidation of *Acacia confusa* Wood. *Polym Degrad Stabil* 95(9): 1518-1522. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.06.012>

**CIELab. 2007.** Colourimetry. Part 4: CIE 1976 L\*a\*b\* Colour Space. <http://www.cie.co.at/publications/colorimetry-part-4-cie-1976-lab-colour-space>

**Cui, W.; Kamdem, P.; Rypstra, T. 2004.** Diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy (DRIFT) and color changes of artificial weathered wood. *Wood Fiber Sci* 36(3): 291-301. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1545/1545>

**Cui, X.; Matsumura, J. 2019.** Wood Surface Changes of Heat-Treated *Cunninghamia lanceolata* Following Natural Weathering. *Forests* 10(9): 791. <https://doi.org/10.3390/f10090791>

**Davor, K.; Boštjan L.; Thaler, N.; Humar, M. 2018.** Influencia de la intemperie natural y artificial en el cambio de color de diferentes maderas y materiales a base de madera. *Forests* 9(8): 488. <https://doi.org/10.3390/f9080488>

**Evans, P.; Thay, P.; Schmalzl, K. 1996.** Degradation of wood surfaces during natural weathering. Effects on lignin and cellulose and on the adhesion of acrylic latex primers. *Madera- Cienc Tecnol* 30(6): 411-422. <https://doi.org/10.1007/BF00244437>

**Evans, P.; Owen, N.; Schmid, S.; Webster, R. 2002.** Weathering and photostability of Benzoylated wood. *Polym Degrad Stabil* 76(2): 291-303. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00026-5](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00026-5)

- Franke, S.; Marto, J. 2014.** Investigation of *Eucalyptus globulus* wood for the use as an engineered material. En: Salenikovich, A. (ed.) World Conference of Timber Engineering(WCTE): Quebec, Canadá.
- Gullón-Estévez, P.; González-Muñoz, M. 2008.** Membrane processing of liquors from *Eucalyptus globulus* autohydrolysis. *J Food Eng* 87(2): 257-265. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.11.032>
- George, B.; Suttie, E.; Merlin, A.; Deglise, X. 2005.** Photodegradation and photostabilisation of wood the state of the art. *Polym Degrad Stabil* 88(2): 268-274. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.10.018>
- Griebeler, C.; Tondi, G.; Schnabel, T.; Iglesias, C.; Ruiz, S. 2018.** Reduction of the surface colour variability of thermally modified *Eucalyptus globulus* wood by colour pre grading and homogeneity thermal treatment. *Eur J Wood Wood Prod* 76(5):1495-1504. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1310-3>
- Hon, D. 2001.** *Wood and Cellulosic Chemistry*. Second Edition. ISBN 0-8247-0024-4. Edited by David N.-S. Hon (Clemson University) and Nubuo Shiraishi (Kyoto University). Marcel Dekker: New York and Basel. 914 pp. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ja015237p>
- Humar, M.; Davor, K.; Lesar, B.; Brischke, C. 2019.** The Performance of Wood Decking after Five Years of Exposure: Verification of the Combined Effect of Wetting Ability and Durability. Reprinted from: *Forests* 10(10): 903. <https://doi.org/10.3390/f10100903>
- Lovaglio, T.; Gindl-Altmutter, W.; Meints, T.; Moretti, N.; Todaro, L. 2019.** Wetting Behavior of Alder (*Alnus cordata* (Loisel) Duby) Wood Surface: Effect of Thermo-Treatment and Alkyl Ketene Dimer (AKD). *Forests* 10(9):770. <https://doi.org/10.3390/f10090770>
- Mattos, B.; Cademartori, P.; Lourençon, T. Gatto, D. 2013.** Colour changes of Brazilian eucalypts wood by natural weathering. *International Wood Products Journal* 5(1): 33-38. <https://doi.org/10.1179/2042645313Y.0000000035>
- Negrão, D.; Silva Júnior, T.; Passos, J.; Sansígolo, C.; Minhoni, M.; Furtado, E. 2014.** Biodegradation of *Eucalyptus urograndis* wood by fungi. *Int Biodeter Biodegr* 89: 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.01.004>
- Oberhofnerova, E.; Pánek, M.; García-Cimarras, A. 2017.** The effect of natural weathering on untreated wood surface. *Maderas- Cienc Tecnol* 19 (2): 173-184. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2017005000015>
- Ozgenç, O.; Hiziroglu, S.; Yildiz, U. C. 2012.** Weathering properties of wood speciesm treated with different coating applications. *Bioresources* 7(4): 4875-4888. <https://doi.org/10.15376/biores.7.4.4875-4888>
- Pandey, K.K. 2005.** Study of the effect of photo-irradiation on the surface chemistry of Wood. *Polym Degrad Stabil* 90(1): 920. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.02.009>
- Rodríguez-Anda, R.; Fuentes-Talavera, F. J. 2003.** Factores que intervienen en el proceso de envejecimiento de la madera. *Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 9(1): 95-100. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62990110>
- Rozas, C.; Sánchez, R.; Pinedo, P. 2005.** Secado de *Eucalyptus nitens* y *E. globulus* y su aprovechamiento en blocks, pisos y muebles. *Maderas- Cienc Tecnol* 7(2): 109-120. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2005000200005>
- Stat Statistica. 2011.** StatSoft v10 Enterprise, Tulsa, USA. 514.
- Sudiyani, Y.; Imamura, Y.; Doi, S.; Yamauchi, S. 2003.** Infrared spectroscopic investigations of weathering effects on the surface of tropical wood. *J Wood Sci* 49(1): 86-92. [https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL\\_ID=200902273591966276](https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=200902273591966276)
- Touza-Vázquez, M. 2001.** Tensiones de crecimiento en *Eucalyptus globulus* de Galicia. (España). Influencia de la silvicultura y estrategias de aserrado. *Maderas- Cienc Tecnol* 3(1-2): 68-89. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2001000100008>

**Turkoglu, T.; Baysal, E.; Toker, H. 2015.** The Effects of Natural Weathering on Color Stability of Impregnated and Varnished Wood Materials. *Advances in Materials Science and Engineering* 2015(4): 1-9. <https://doi.org/10.1155/2015/526570>