

Reacción al fuego de tres maderas tropicales impregnadas con azoles

Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{1*}, Luz Elena Alfonsina Ávila Calderón¹
¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Morelia,
Michoacán, 58030

*Autor de correspondencia
javier.sotomayor@umich.mx

Resumen

El objetivo de la investigación fue determinar la densidad, el tiempo de ignición, la pérdida de masa y la retención de azoles con concentraciones de uno, dos y tres por ciento en madera de *Tilia mexicana*, *Swietenia macrophylla* y *Andira inermis*, en las que se realizaron las pruebas de reacción al fuego. Las variables de respuesta fueron la densidad de la madera, la retención de azoles, el tiempo de ignición y la pérdida de masa. Los factores de variación fueron la especie y la concentración. La retención de azoles se incrementa a medida que la concentración aumenta. Las magnitudes de *T. mexicana* son mayores respecto a las de *S. macrophylla* y *A. inermis*. Los tiempos de ignición se prolongan a medida que las concentraciones de azoles aumentan. Se observa que los tiempos de ignición son mayores en función del incremento de las densidades entre especies. Para las maderas de *T. mexicana* y *S. macrophylla* la pérdida de masa disminuye a medida que la concentración de azoles aumenta. Las especies de madera con mayores densidades presentan un mejor comportamiento frente al fuego. Su tiempo de ignición es mayor comparativamente con el de maderas de menor densidad. La pérdida de masa disminuye proporcionalmente a la densidad de la madera. Esta relación es lineal y similar a las de las tendencias reportadas en la bibliografía para otras especies.

Palabras claves: *Tilia mexicana*, *Swietenia macrophylla*, *Andira inermis*, Retención de azoles, Tiempo de ignición, Pérdida de masa.

Abstract

The objective of the research was to determine the density, ignition time, mass loss and retention of azoles with concentrations of one, two and three percent in wood of *Tilia mexicana*, *Swietenia macrophylla* and *Andira inermis* in which the reaction to fire tests were carried out. The response variables were wood density, azole retention, ignition time and mass loss. Variation factors were species and concentration. Azole retention increased as concentration increased. The magnitudes of *T. mexicana* are greater than those of *S. macrophylla* and *A. inermis*. It is observed that the times are longer as azole concentrations increase. Likewise, ignition times are observed to be longer as densities increase between species. For *T. mexicana* and *S. macrophylla* wood, mass loss decreases as azole concentration increases. Wood species with higher densities show better fire behavior. Their ignition time is longer compared to lower density woods. Mass loss decreases proportionally to wood density. This relationship is linear and like trends reported in the literature for other species.

Key words: *Tilia mexicana*, *Swietenia macrophylla*, *Andira inermis*, Azole retention, Ignition time, Mass loss.

Introducción

El deterioro de la madera ocasionado por agentes biológicos y/o físicos se puede mitigar con sustancias protectoras. Sin embargo, sus efectos negativos para el medio ambiente restringen su uso generalizado. De tal forma que la tendencia tecnológica contemporánea se orienta hacia el empleo de preservantes amigables con el medio ambiente (Baraúna et al., 2017, Barbero et al., 2018). Los azoles son biocidas solubles en agua, amigables con el medio ambiente y se utilizan como protectores de la madera frente a su deterioro (García et al., 2017, Calovi et al., 2024). Existe evidencia experimental del efecto preservador de los azoles en la madera (Teng et al., 2018, Derkyi, 2020, Jørgensen & Heick, 2021). En las investigaciones se adaptan diferentes concentraciones de preservante y de esta forma, se logran porcentajes de retención particulares a cada especie y caso de estudio. Estos experimentos se realizan preferentemente con tratamientos de impregnación que aplican presión (Presley et al., 2022).

La madera se utiliza en las industrias de la construcción, la papelera, la fabricación de muebles y la producción de combustibles porque es una materia prima natural, biodegradable y renovable. Sin embargo, hay poca investigación realizada sobre su biotecnología. Debido a la creciente preocupación por el medio ambiente, la investigación sobre las condiciones saludables del uso de preservantes es un tema actual. Los enfoques biotecnológicos en el campo de la protección de la madera buscan mejorar la capacidad de tratamiento de la madera con protectores y reemplazar los productos químicos con agentes de control biológico (Wegner et al., 2010). El tebuconazol es un azol de cobre y biosida que se usa para preservar la madera y no contamina el medio ambiente. Su interacción con la lignina de la madera es principalmente como fijador y es necesario para que funcione para reducir las emisiones contaminantes al medio ambiente (Yu et al., 2009). El tebuconazol afecta los hongos simbióticos y la abundancia relativa de saprófitos y patógenos, lo que indica que ofrece una nueva estrategia de manejo de insectos para retrasar el aumento de la resistencia a los insecticidas (Cai et al., 2023).

La retención de una sustancia protectora en una pieza de madera indica la cantidad de sustancia activa que retiene después de un tratamiento de impregnación (Ávila et al., 2017). La densidad de la madera es el parámetro de referencia para estimar sus propiedades mecánicas (Niklas & Spatz, 2010). El tiempo de ignición se define como el lapso requerido para percibir la flama sostenida en la superficie de una muestra expuesta a un flujo de calor incidente y es un factor importante para evaluar el comportamiento de combustión de los materiales (Boonmee & Quintiere, 2002). Cuanto más corto sea el tiempo de ignición, más inflamable es el material (Xu et al., 2015). La pérdida de masa como resultado de la exposición de la madera al fuego es proporcional a la densidad de la madera (Rocha & Landesmann, 2016) y depende de la especie, de la temperatura y del tiempo de exposición. A menor pérdida de masa de una especie expuesta al fuego en condiciones controladas de laboratorio, mejor su comportamiento en caso de incendio (Ragan et al., 2016).

Cuando la superficie de un elemento de madera se expone a una fuente de calor externa, sea por radiación térmica o por convección de gases calientes, el calor se transfiere desde la superficie hacia el interior. De tal forma que la temperatura en diferentes profundidades del sólido se incrementa con el tiempo. En consecuencia, el sólido experimenta una descomposición térmica y un proceso de degradación química para producir carbón y gases combustibles (Shen et al., 2023). Este proceso se define como la ignición de la madera.

Los datos sobre la factibilidad de una especie para ser impregnada con azoles empleando el método del baño caliente-frío son escasos. Igualmente, es limitada la información sobre su efecto como retardante a la combustión de la madera (Mensah et al., 2023). En la presente investigación se interroga sobre la capacidad para retener azoles de maderas tropicales y su influencia sobre la variación de su densidad, tiempo de ignición y pérdida de masa, cuando la madera es expuesta al fuego en condiciones controladas de laboratorio.

Para responder a esta duda, la hipótesis de trabajo plantea que la retención y el tiempo de

ignición aumentan a medida que la concentración de preservante se incrementa, y en sentido opuesto, que la pérdida de masa disminuye. Para verificar esta hipótesis, el objetivo de la investigación fue determinar la densidad, el tiempo de ignición, la pérdida de masa y la retención de azoles con concentraciones de uno, dos y tres por ciento en tres maderas tropicales.

Para alcanzar este objetivo se realizaron pruebas de reacción al fuego en madera de *Tilia mexicana*, *Swietenia macrophylla* y *Andira inermis*. Estas especies tropicales son endémicas de México y Centroamérica y tienen potencial tecnológico para su empleo en la industria de la madera y sus productos derivados (Cordero & Boshier, 2003, Tamarit & López, 2007, Rendón et al., 2021).

Materiales y Métodos

Se prepararon 120 probetas de *T. mexicana*, *S. macrophylla* y *A. inermis* con dimensiones de 20 mm x 20 mm x 150 mm orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respectivamente. Las probetas contenían únicamente madera de duramen y estaban libres de defectos de crecimiento. Las probetas se almacenaron en una cámara de acondicionamiento con temperatura de 20 °C y una humedad relativa del aire de 65% hasta que alcanzaron un contenido de humedad en

equilibrio de 11%. El contenido de humedad se determinó por el método de diferencia de pesos de acuerdo con la norma ISO 13061-1:2014 (ISO, 2014a), y la densidad de la madera se determinó de acuerdo con la norma ISO 13061-2:2014 (ISO, 2014b).

El preservante de azoles de cobre se preparó con apego a la Norma NMX-C-178-ONNCCE-2001 (ONNCCE, 2001) en concentraciones de 1%, 2% y 3%. El método de baño caliente-frío siguió el procedimiento reportado en Sotomayor & Ávila (2021). La retención se determinó de acuerdo con Simsek et al. (2013). La penetración se midió por métodos colorimétricos de acuerdo con la norma mexicana NMX-C-410-ONNCCE-1999 (ONNCCE, 1999) y se clasificó de acuerdo con Pereira et al. (2017). Las pruebas de reacción al fuego (Figura 1) se realizaron siguiendo el protocolo propuesto por Sotomayor & Gallegos (2018). La probeta se expuso durante dos minutos al fuego directo de la flama de 9 cm de altura de un mechero de laboratorio tipo *Meker-Fisher*, con regulación de aire y de gas, con quemador de 30 mm de diámetro y temperatura máxima de 1300 °C. Con un cronómetro, se midió el tiempo necesario para que apareciera la ignición en al menos tres caras de la probeta expuestas a la flama. Esta medición describe el tiempo de ignición. La pérdida de masa se calculó de acuerdo con Yuksel et al. (2014).

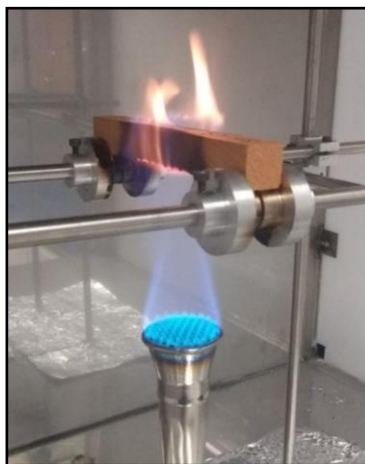


Figura 1. Prueba de reacción al fuego.

Diseño experimental

La unidad experimental consistió en 120 probetas de madera de *T. mexicana*, *S. macrophylla* y *A. inermis*. Para cada especie se estudiaron tres grupos experimentales de

diez probetas (Réplicas) cada uno y un grupo de control también de diez unidades. Para la concentración (C) se consideró el tratamiento con cuatro niveles: tres concentraciones C = 1% (n = 10), C = 2% (n = 10) y C = 3% (n =

10) y como grupo de control se consideró el no tratamiento de impregnación (concentración $C = 0\%$, $n = 10$). Las variables de respuesta fueron la densidad de la madera (ρ_{CH}), la retención de azoles (R), el tiempo de ignición (t_{ign}) y la pérdida de masa (Δm). Los factores de variación fueron la especie y la concentración. Con este procedimiento se estudiaron cuarenta y ocho muestras independientes entre sí, homogéneas y recolectadas completamente al azar (tres especies por cuatro niveles por cuatro variables de respuesta).

Para las muestras agrupadas de cada especie se realizaron pruebas de normalidad y de verificación de varianza. Se realizaron además análisis de esta medida para un nivel de confianza del 95%. El criterio de demarcación para aceptar una diferencia estadísticamente significativa fueron valores $P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$. Se calcularon correlaciones lineales ($y = ax + b$) con sus coeficientes de determinación (R^2) entre las retenciones, los tiempos de ignición y las pérdidas de masa como variables dependientes de la densidad considerada como variable explicativa.

Resultados y discusión

Para las tres especies en estudio, las pruebas de normalidad confirmaron la regularidad en las distribuciones de todas las muestras correspondientes a las tres concentraciones ($C = 1\%$, $C = 2\%$ y $C = 3\%$) y a la del grupo de control ($C = 0\%$). En el mismo sentido, las

pruebas de verificación de varianza de las muestras correspondientes a cada especie señalan que no existen diferencias estadísticamente significativas entre sus desviaciones estándar. Estos resultados permitieron aplicar un enfoque comparativo del efecto de las concentraciones de azoles y su efecto en la retención, la densidad, el tiempo de ignición y la pérdida de masa. La madera se estabilizó a un contenido de humedad de 11%, lo que permitió considerar las probetas en estado seco y que su contenido de humedad no interviene en el fenómeno observado.

En contraste con lo anteriormente mencionado, las tres especies se diferencian entre sí por los valores promedio de sus respectivos parámetros (Tabla 1) desde dos ángulos. Por una parte, se confirma que los ensayos relativos al comportamiento de la madera al fuego originan resultados con variabilidad, y por la otra, se colige que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados correspondientes a las tres especies. Una interpretación de estos resultados es que el comportamiento al fuego de la madera es singular a cada especie (Pánek et al., 2021), argumento que coincide con las conclusiones de Friquin (2011). Por lo tanto es posible afirmar que en la literatura sobre el tópico de investigación está documentada la dificultad para obtener resultados experimentales precisos y/o coherentes (Babrauskas, 2005).

Tabla 1. Densidad, retención, tiempo de ignición y pérdida de masa.

Especies	Concentración		ρ_{CH} (kg m^{-3})	R (kg m^{-3})	t_{ign} (s)	Δm (%)
<i>Tilia mexicana</i>	C = 0%	M	465	-	35	26
		CV	(10)	-	(15)	(10)
	C = 1%	M	449	4,2	45	23
		CV	(12)	(2)	(15)	(16)
	C = 2%	M	417	6,3	46	22
		CV	(12)	(14)	(14)	(14)
	C = 3%	M	429	8,0	52	22
		CV	(16)	(15)	(11)	(17)
<i>Swietenia macrophylla</i>	C = 0%	M	543	-	49	19
		CV	(10)	-	(9)	(11)
	C = 1%	M	521	0,2	63	22
		CV	(9)	(12)	(13)	(17)

Artículos

	C = 2%	M	537	1,3	61	25
		CV	(9)	(2)	(14)	(8)
	C = 3%	M	522	2,3	61	25
		CV	(6)	(29)	(5)	(9)
<i>Andira inermis</i>	C = 0%	M	738	-	65	14
		CV	(5)	-	(21)	(15)
	C = 1%	M	736	0,5	79	15
		CV	(4)	(21)	(13)	(11)
	C = 2%	M	716	1,2	69	16
		CV	(4)	(24)	(11)	(7)
	C = 3%	M	761	1,6	72	16
		CV	(6)	(16)	(5)	(16)

ρ_{CH} = Densidad; R = Retención; t_{ign} = Tiempo de ignición; Δm = Pérdida de masa; C = Concentración; μ = Media; CV = Coeficiente de variación en por ciento y entre paréntesis; Contenido de humedad (CH) = 11%.

Impregnado con azoles

El impregnado de la madera con azoles modifica su color natural. A mayor concentración, la coloración se oscurece (Figura 2). Este resultado es similar al reportado por Jirouš-Rajković & Miklečić (2021) quienes señalan la modificación del color natural de la madera cuando es tratada

con azoles. Este fenómeno también es observado por Lee et al. (2015) al impregnar madera de *Pinus densiflora* ($\rho_{CH} = 470 \text{ kg m}^{-3}$) con azoles de cobre en concentraciones de 0,05% a 1,25%, logrando retenciones desde $0,37 \text{ kg m}^{-3}$ hasta $9,44 \text{ kg m}^{-3}$ respectivamente.



Tilia mexicana: C = 0% (sin tratamiento), C = 1%, C = 2%, C = 3%



Swietenia macrophylla: C = 0% (sin tratamiento), C = 1%, C = 2%, C = 3%



Andira inermis: C = 0% (sin tratamiento), C = 1%, C = 2%, C = 3%

Figura 2. Modificación del color de la madera de acuerdo con la concentración (C) de azoles.

Retención

La retención de azoles se incrementa a medida que la concentración aumenta (Tabla 1 y Figura 3). Las magnitudes de *T. mexicana* son mayores respecto a las de *S. macrophylla* y *A. inermis*. Las retenciones de estas dos últimas especies son similares entre ellas. La variabilidad de la retención de azoles en *T. mexicana*, caracterizada por el coeficiente de

variación, se incrementa hasta 15% a medida que la concentración aumenta a partir del grupo de control. Por su parte, el coeficiente de variación de *S. macrophylla* se incrementa hasta un 29% y el de *A. inermis* es de 16%. Así, la intensidad de la concentración de azoles usada implica que la magnitud de su retención se amplifique.

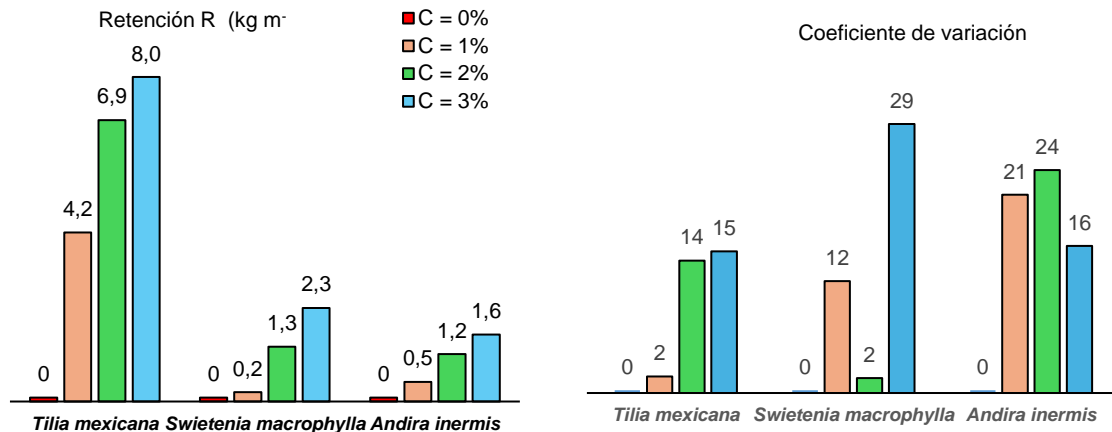


Figura 3. Comparativo de la retención (R) y de su coeficiente de variación (CV) en función de la concentración (C). Datos de la Tabla 1.

Para cada una de las tres especies, el análisis de varianza de las retenciones indica diferencias estadísticamente significativas ($P_{(\alpha = 0,05)} < 0,001$) entre las concentraciones 1%, 2% y 3% y el testigo C = 0% considerado grupo de control. Sus coeficientes de variación no presentan una tendencia definida respecto a las concentraciones de azoles aplicadas. La regresión entre la retención y la densidad indica una tendencia negativa y presenta una amplia dispersión de los valores particulares a cada especie (Figura 4). Como resultado, se obtiene un coeficiente de determinación muy

bajo ($R^2 = 0,34$). En las figuras cuatro, siete y diez, los datos al interior de los recuadros representan valores correspondientes a las concentraciones detalladas en la Tabla 1.

Estos resultados indican por una parte, que la retención de azoles aumenta a medida que sus concentraciones se incrementan, y por otra, que la retención de azoles decrece cuando la densidad de la madera disminuye. Este efecto es particular a cada especie.

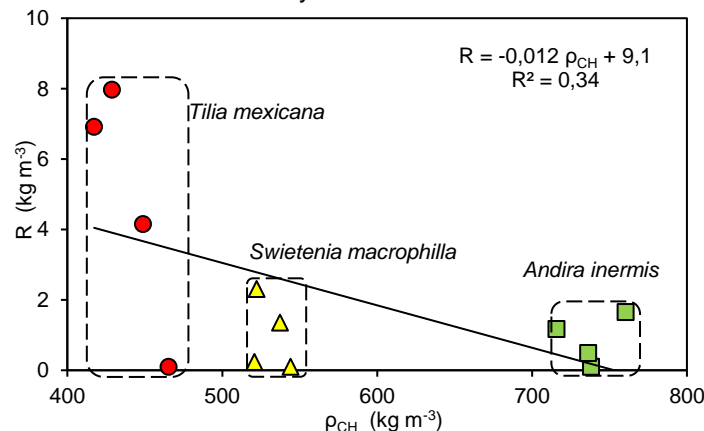


Figura 4. Dispersión y correlación de la retención (R) en función de la densidad (ρ_{CH}).

Las magnitudes de las retenciones de *T. mexicana* son similares a las reportadas por Bahchevandzиеv & Mihajlovski (2021) quienes obtuvieron una retención de azoles de 5 kg m^{-3} en madera de *Picea abies* con una densidad similar a la de *T. mexicana* de $\rho_{\text{CH}} = 450 \text{ kg m}^{-3}$. En el mismo sentido, Lee et al. (2006) reportan retenciones de azoles de $6,5 \text{ kg m}^{-3}$ en *Pinus koraiensis* y de $5,5 \text{ kg m}^{-3}$ para *Larix leptolepis*, ambas especies con densidades de 450 kg m^{-3} y similares a la de *T. mexicana*.

A partir de la concentración de azoles de 1%, las retenciones de *T. mexicana* satisfacen el criterio de riesgo de deterioro del nivel 5 sugerido por la Asociación Americana de Protección de la Madera, en adelante AWPA por sus siglas en inglés *American Wood Protection Association*, en la norma AWPA E1-15 (AWPA, 2015). Para *S. macrophylla* únicamente la concentración de 3% satisface los niveles de riesgo 1, 2 y 3. En el caso de *A. inermis* ninguna concentración de azoles y sus retenciones resultantes satisfacen los requerimientos discutidos.

Las retenciones obtenidas *T. mexicana* con concentraciones de azoles de 1%, 2% y 3% son suficientes para satisfacer la cantidad mínima de retención recomendada por la AWPA, para elementos estructurales empleados en interiores, la cual es de $2,72 \text{ kg m}^{-3}$ (AWPA P5-07, 2014). Para el caso de las maderas de *S. macrophylla* y *A. inermis* las

concentraciones de azoles máximas aplicadas de 3% no satisfacen este requisito.

Los resultados anteriores son igualmente aplicables para los criterios de la norma NMX-C-322-ONNCCE-2014 (ONNCCE, 2014). Esta normativa recomienda para el nivel de riesgo R1, correspondiente a madera en interiores de uso no estructural, retenciones de sustancias preservadoras en madera de al menos $2,7 \text{ kg m}^{-3}$. Además, la concentración de azoles $C = 3\%$ en *T. mexicana* alcanza una retención de $8,0 \text{ kg m}^{-3}$ y así cumple con el nivel de riesgo R2 que requiere $6,4 \text{ kg m}^{-3}$ de preservante retenido en la madera.

Densidad

El análisis de varianza de las tres especies indica la no existencia de diferencias significativas entre las densidades obtenidas para los tres concentraciones y el grupo de control. Este resultado se explica de manera gráfica en el comparativo (detallado en la Figura 5) de la densidad en función de la concentración. Las diferencias numéricas entre densidades entre el grupo de control y los tres tratamientos; es decir, las concentraciones de 1%, 2% y 3% (Tabla 1), se explican por la variación natural de la densidad al interior de una especie (Silva et al., 2010) y por el efecto del impregnado con el método baño caliente-frío, procedimiento que modifica temporalmente el contenido de humedad de la madera y su capacidad para retener agua (Sotomayor & Ávila, 2019).

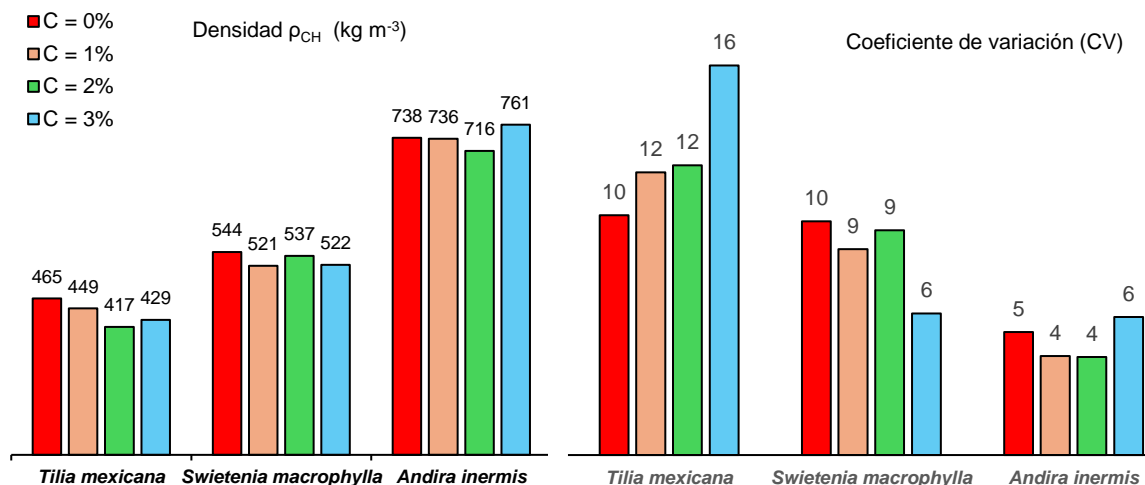


Figura 5. Comparativo de la Densidad (ρ_{CH}) y de su coeficiente de variación (CV) en función de la concentración (C). Datos de la Tabla 1.

Estas diferencias de 8% para *T. mexicana*, y de 4% para *S. macrophylla*, disminuyen a medida que la densidad de la especie aumenta. Como corolario, se observa que la densidad de *A. inermis* aumenta 3%, dado que esta madera exhibe una densidad 46% mayor al promedio de las densidades de *T. mexicana* y *S. macrophylla*. Esto significa que, a mayor densidad de la madera, es menor el efecto de la retención de azoles en la variación de este parámetro. El tratamiento con azoles de la madera de *T. mexicana* incrementa la variabilidad natural de su densidad de un 10% hasta un 16% (Tabla 1 y Figura 5). Para *A. inermis* este aumento es mínimo y va de 5% a 6%. En cambio, el coeficiente de variación de la densidad de *S. macrophylla* disminuye de un 10% hasta un 6%. Así, se observa una variabilidad particular a cada especie y según la concentración de azoles aplicada.

Tiempo de ignición

Los resultados del análisis de varianza del tiempo de ignición señalan que existe diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las tres concentraciones y el grupo de control ($P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$). Las magnitudes de estas variaciones se observan en el comparativo del tiempo de ignición relacionado con la concentración de azoles (Figura 6). Los tiempos de ignición se prolongan a medida que las concentraciones de azoles aumentan. Igualmente, se observa que los tiempos de ignición son mayores en función del incremento de las densidades entre especies. Este resultado se combina con el del aumento de las retenciones a medida que las concentraciones aumentan. Además, el incremento de las densidades entre especies es un factor que retrasa el tiempo de ignición. Este argumento se detalla en la dispersión y correlación del tiempo de ignición en función de la densidad (Figura 7) con un coeficiente de determinación medio ($R^2 = 0,68$).

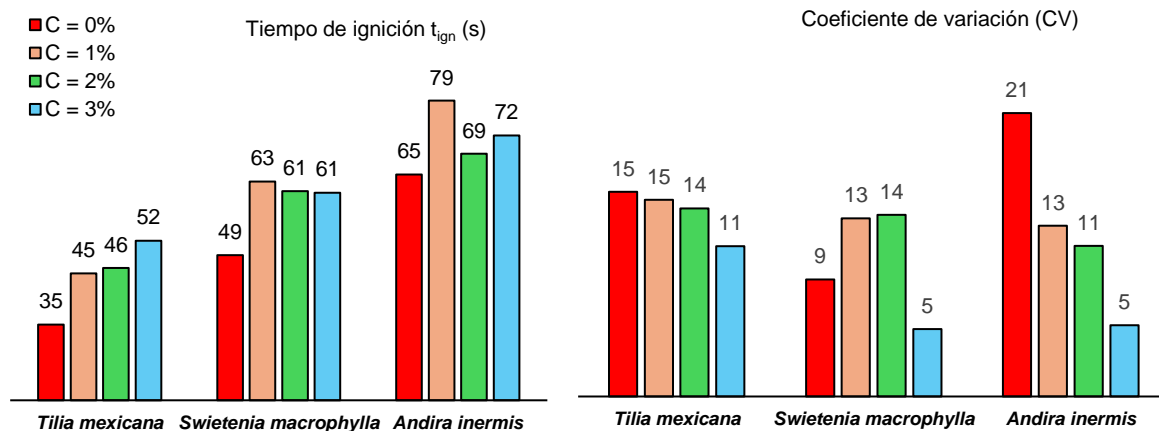


Figura 6. Comparativo del tiempo de ignición (t_{ign}) y de su coeficiente de variación (CV) en función de la concentración (C) con datos de la Tabla 1.

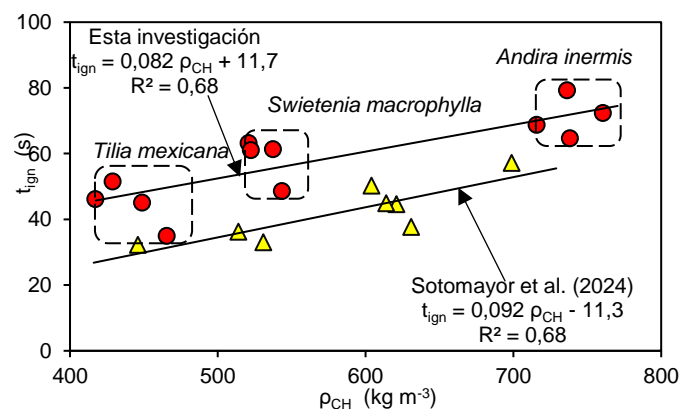


Figura 7. Dispersión y correlación del tiempo de ignición (t_{ign}) en función de la densidad (ρ_{CH}).

El tiempo de ignición correspondiente al grupo de control y a las tres concentraciones aplicadas en *T. mexicana*, *S. macrophylla* y *A. inermis* siguen la misma tendencia que las retenciones de ocho especies tropicales (sin tratamiento de impregnación) reportadas en la bibliografía (Tabla 2, Sotomayor et al., 2024) derivadas de pruebas de reacción al fuego

similares a las realizadas en la presente investigación. Los tiempos de ignición se agrupan de acuerdo con las retenciones de *T. mexicana*, *S. macrophylla* y *A. inermis* (Figura 7). En ambas correlaciones, la densidad explica el aumento del tiempo de ignición con un 68% de probabilidad ($R^2 = 0,68$).

Tabla 2. Densidad, tiempo de ignición y pérdida de masa reportados en Sotomayor et al. (2024).

	Especies	ρ_{CH} (kg m ⁻³)	t_{ign} (s)	Δm (%)
1	<i>Cupressus lindleyi</i>	446	32	23
2	<i>Cedrela odorata</i>	514	36	22
3	<i>Swietenia macrophylla</i>	531	33	21
4	<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	604	50	17
5	<i>Fraxinus uhdei</i>	621	45	22
6	<i>Fagus mexicana</i>	631	38	22
7	<i>Dalbergia palo-escrito</i>	614	45	27
8	<i>Guazuma ulmifolia</i>	699	57	17

ρ_{CH} = Densidad; t_{ign} = Tiempo de ignición; Δm = Pérdida de masa.

El comportamiento al fuego de la madera depende de su densidad, contenido de humedad, permeabilidad y de la especie, así como de las condiciones de exposición: orientación, tamaño de la probeta, dirección de la fibra, temperatura y presencia de oxígeno (Bartlett et al., 2019). Así, el coeficiente de variación del tiempo de ignición de *T. mexicana*, *S. macrophylla* y *A. inermis* disminuye cuando la concentración de azoles aumenta. A partir del coeficiente de variación del grupo de control, correspondiente a la no impregnación $C = 0\%$, para *T. mexicana* disminuye de 15% a 11%; para *S. macrophylla* la reducción va de 9% a 5%; y para *A. inermis* se observa una disminución del coeficiente de variación de 21% a 5% (Tabla 1, Figura 6). Caso particular es el de *S. macrophylla* cuyas concentraciones de azoles $C = 1\%$ y $C = 2\%$ incrementan la variabilidad del tiempo de ignición.

Pérdida de masa

Factores como la permeabilidad, la anatomía, contenido de humedad y composición química afectan a la velocidad de combustión de la madera. Sin embargo, la densidad se reconoce como el factor principal que

determina la velocidad de combustión. Generalmente, las maderas más densas tienen una combustión más lenta (Pinto et al., 2016). Esta propuesta coincide con las conclusiones de Ragan et al. (2016) respecto a la dependencia de la pérdida de masa de la composición química de la madera y de su densidad.

No obstante que es difícil de aplicar resultados experimentales producidos en condiciones de laboratorio en la conformación de criterios de seguridad en caso de incendio, hay evidencia empírica de que los valores obtenidos de los ensayos de resistencia al fuego en condiciones de laboratorio se correlacionan con los resultados de los incendios a gran escala (Babrauskas, 2005; Chung, 2010; Xu et al., 2015). A manera de ilustración de los resultados, la Figura 8 muestra la geometría de las probetas de *T. mexicana*, *S. macrophylla* y *A. inermis* después de las pruebas de exposición al fuego una vez eliminada la zona carbonizada. La pérdida de masa calculada es resultado de la reducción de la sección transversal de la probeta en el área que estuvo expuesta al fuego.

Artículos

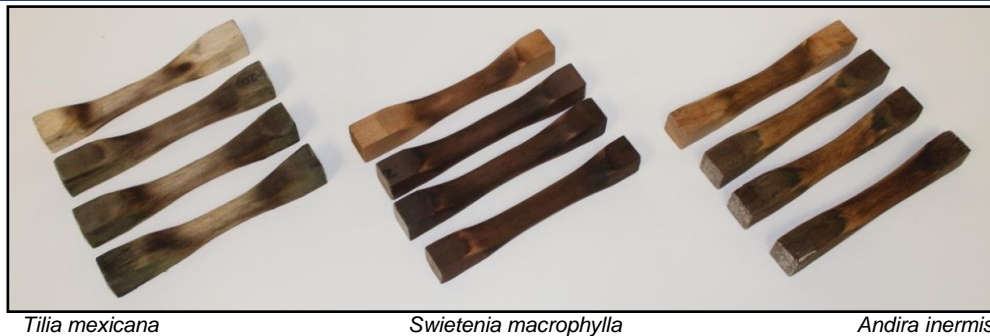


Figura 8. Geometría de las probetas después de las pruebas de exposición al fuego. Concentración de azoles de arriba hacia abajo: C = 0% (control), C = 1%, C = 2% y C = 3%.

Para las maderas de *T. mexicana* y *S. macrophylla* la pérdida de masa disminuye a medida que la concentración de azoles aumenta (Tabla 1 y Figura 9). Para *A. inermis* la pérdida de masa se incrementa para las concentraciones C = 1% y C = 2% y disminuye para C = 3%; sin embargo, su magnitud en promedio es 36% menor. Este resultado se explica por la baja correlación ($R^2 = 0,14$) entre la pérdida de masa y la densidad (Figura 10). De manera similar a la tendencia del tiempo de ignición, las pérdidas de masa se

agrupan de acuerdo con las retenciones. Para situar los resultados de esta investigación, en la Figura 10 se presenta la correlación entre las pérdidas de masa de ocho maderas enlistadas en la Tabla 2 (Sotomayor et al., 2024) respecto a su densidad. En este caso, la tendencia es similar a la de esta investigación; es decir, la pérdida de masa disminuye cuando la densidad de la madera se incrementa. La correlación entre estas dos variables es fuerte ($R^2 = 0,79$).

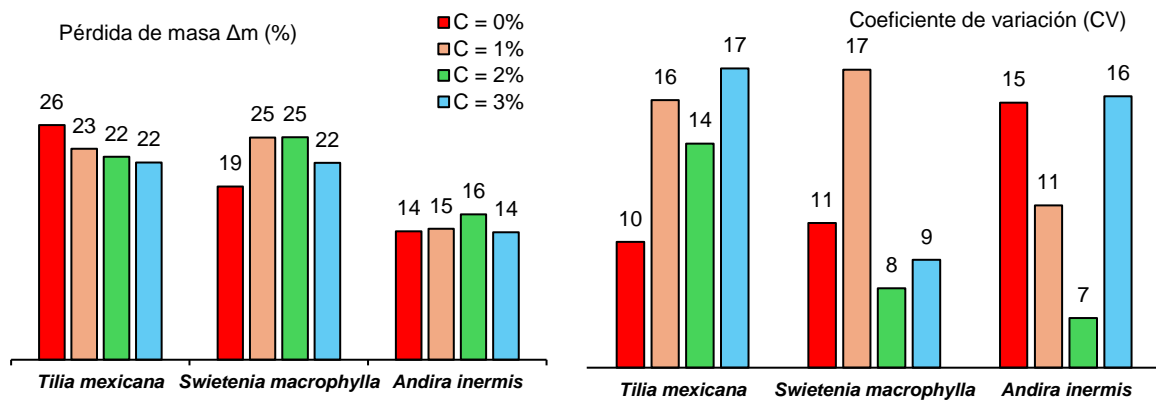


Figura 9. Comparativo de la pérdida de masa (Δm) y de su coeficiente de variación (CV) en función de la concentración (C) con datos de la Tabla 1.

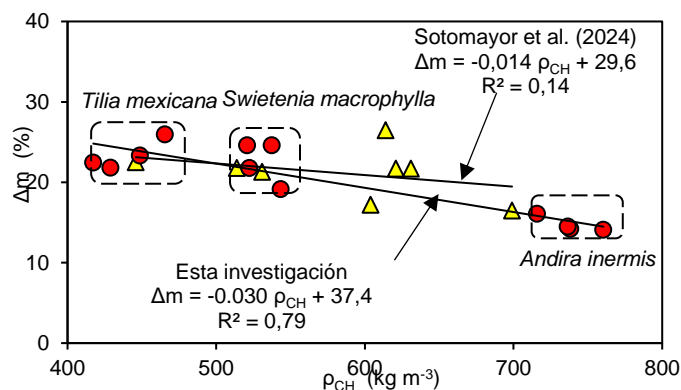


Figura 10. Dispersión y correlación de la pérdida de masa (Δm) en función de la densidad (ρ_{CH}).

Los resultados de investigaciones realizadas con protocolos experimentales similares, como es el caso de esta investigación y el de Sotomayor et al. (2024), pueden mostrar tendencias comparables. Empero, la explicación cuantitativa, representada por las correlaciones de estas tendencias, es particular a cada estudio. La pérdida de masa en los datos de Sotomayor et al. (2024) indica una correlación muy baja con respecto a la densidad de la madera (Figura 10).

El tiempo de ignición y la pérdida de masa son parámetros derivados de pruebas de reacción al fuego que pueden explicar el efecto de los azoles como agentes para retardar la combustibilidad de la madera (Lowden & Hull, 2013, Mensah et al., 2023.) En la presente investigación, sus magnitudes son determinadas en condiciones controladas de laboratorio y ensayando probetas de pequeñas dimensiones. Igualmente, las retenciones de azoles en la madera se refieren al tratamiento de impregnación específico a las especies *T. mexicana*, *S. macrophylla* y *A. inermis*. Los resultados son indicadores de la reacción al fuego de estas especies delimitadas por las condiciones experimentales descritas en esta investigación.


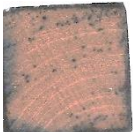




Penetración

Las penetraciones de azoles en la madera de *T. mexicana* con concentraciones de 1%, 2% y 3% indican una difusión total regular del preservante en la sección transversal y un cambio del color natural de la madera (Tabla 3). La norma NMX-C-322-ONNCCE-2014

(ONNCCE, 2014) exige como requisito mínimo de penetración el 100% en piezas de madera con dimensiones máximas de 25 mm en las direcciones radial y/o tangencial de la madera de albura. De aquí, *T. mexicana* satisface este criterio. Por el contrario, *S. macrophylla* y *A. inermis* no lo hacen. Ambas maderas presentan penetraciones parciales e irregulares. En consecuencia, considerando las condiciones experimentales de la presente investigación, la madera de *T. mexicana* se aprecia como una especie permeable a la impregnación con azoles por el método de baño caliente-frío. En cambio, *S. macrophylla* y *A. inermis* son especies menos permeables (Moya et al., 2021).

Estos resultados se relacionan con las diferentes magnitudes de la retención de azoles en cada una de las especies. La retención en *T. mexicana* es en promedio cinco veces mayor que las de *S. macrophylla* y *A. inermis* (Tabla 1 y Figura 3). En el mismo contexto, la penetración explica el coeficiente de variación de la retención dos veces menor de *T. mexicana* en comparación con el promedio de los coeficientes de *S. macrophylla* y *A. inermis*. En el mismo sentido, la penetración de azoles se corresponde con la magnitud del tiempo de ignición. A mayor penetración de sustancia preservante en la sección transversal de una probeta de madera, su tiempo de ignición se difiere (Tabla 1 y Figura 6). Para el caso de la pérdida de masa, en las tres especies estudiadas no se observa una influencia importante de la penetración en sus magnitudes y sus coeficientes de variación (Tabla 1 y Figura 9).

Tabla 3. Comparativo de la penetración de azoles en relación con la concentración.

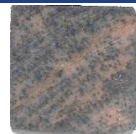
Concentración (C)	Especies		
	<i>Tilia mexicana</i>	<i>Swietenia macrophylla</i>	<i>Andira inermis</i>
C = 1%	 Total regular	 Parcial irregular	 Parcial regular
C = 2%	 Total regular	 Parcial irregular	 Parcial irregular

Artículos

C = 3%



Total regular



Parcial irregular



Parcial irregular

Conclusiones

Las pruebas de comportamiento al fuego adecuadas especialmente para este caso de estudio permiten comparar el tiempo de ignición y la pérdida de masa de la madera como efecto de la impregnación con azoles de tres especies tropicales.

Comparativamente con la madera de *T. mexicana*, *S. macrophylla* y *A. inermis* sin impregnación, el tratamiento con azoles en concentraciones de 1%, 2% y 3% se traduce en el aumento del tiempo de ignición y en la disminución de la pérdida de masa, ocasionados ambos por la exposición al fuego de probetas de pequeñas dimensiones y en condiciones controladas de laboratorio. Esta mejora tecnológica amplía las perspectivas de estas especies para su empleo en la industria de la construcción y de productos a base de madera.

Las especies de madera con mayores densidades presentan un mejor comportamiento frente al fuego. Su tiempo de ignición es mayor comparativamente con el de maderas de menor densidad. La pérdida de masa disminuye en proporción con la densidad de la madera. Esta relación es lineal y similar a las de las tendencias reportadas en la bibliografía para otras especies.

Los resultados de esta investigación son concluyentes, pero restringidos para las condiciones experimentales particulares al procedimiento experimental propuesto. Para su aplicación práctica en diseño de estructuras y productos de madera, se recomienda realizar ensayos con protocolos estandarizados y utilizar piezas de madera con dimensiones próximas a las de empleo.

Agradecimientos

A los alumnos de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), por su colaboración en los trabajos de laboratorio. La investigación fue financiada

por la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH.

Referencias

American Wood Protection Association (2014) AWPA P5-07. Standard for Waterborne Preservatives. American Wood Protection Association, Chicago.

American Wood Protection Association (2015) AWPA E1-15. Standard Method for Laboratory Evaluation to Determine Resistance to Subterranean Termites. American Wood Protection Association, Chicago.

Ávila Calderón LEA, Castro Sánchez FJ, Herrera Ferreyra M, Raya González D (2017) Azoles de cobre en la preservación de la madera en México. *Pistas Educativas* 126:31-41.

<https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/1019>

Babrauskas V (2005) Charring rate of wood as a tool for fire investigations. *Fire Safety Journal* 40(6):528-554. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.05.006>

Bahchevandziev K, Mihajlovski N (2021) Surface retention of polyurethane and acrylic coatings on impregnated spruce wood (*Picea abies* Karst.) and comparison with some wood preservatives. *Baltic Forestry* 27(2):223. <https://doi.org/10.46490/BF223>

Baraúna EEP, Paes JB, Monteiro TC, Moulin JC, Ferreira GL, Silveira AG, Baldin T, Sette Junior CR, Arantes MDC (2020) Influence of impregnation with boron compounds in the physical properties of Eucalyptus wood. *Scientia Forestalis* 48(128):e3383. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.09>

Barbero López A, Chibily S, Scheepers G, Grahn T, Venäläinen M, Haapala A (2018) Analysis of Green Wood Preservation Chemicals. *International Journal of Environmental and Ecological Engineering* 12(3):175-181.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.1315826>

Bartlett AI, Hadden RM, Bisby LA (2019) A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction. *Fire Technology* 55:1-49. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0787-4>

Y

Boonmee N, Quintiere JG (2002) Glowing and flaming autoignition of wood. *Proceedings of the Combustion Institute* 29(1):289-296. [https://doi.org/10.1016/S1540-7489\(02\)80039-6](https://doi.org/10.1016/S1540-7489(02)80039-6)

Buchanan A, Östman B (2022) *Fire Safe Use of Wood in Buildings. Global Design Guide.* CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781003190318>

Cai Y, Ren Z, Li C, Cai T, Yu C, Zeng Q, He S, Li J (2023) The insecticidal activity and mechanism of tebuconazole on *Nilaparvata lugens* (Stål). *Pest Management Science* 79(9):3141-3148. <https://doi.org/10.1002/ps.7493>

Calovi M, Zanardi A, Rossi S (2024) Recent Advances in Bio-Based Wood Protective Systems: A Comprehensive Review. *Applied Sciences* 14:736. <https://doi.org/10.3390/app1402073>

Chung Y (2010) Comparison of combustion properties of native wood species used for fire pots in Korea. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 16(1):15-19. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2010.01.031>

Cordero J, Boshier DH (2003) *Árboles de Centroamérica.* Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba.

Derkyi N (2020) Azoles for Renewable Energy Development and Wood Treatment. In: *Azoles - Synthesis, Properties, Applications and Perspectives.* In: *Azoles - Synthesis, Properties, Applications and Perspectives.* Kuznetsov A (ed). IntechOpen, London. pp. 1-21. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93472>

Friquin K (2011) Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber. *Fire and Materials* 35(5):303-327. <https://doi.org/10.1002/fam.1055>

García Ortiz VR, Benítez Rocha G, Martínez Pacheco M, Velázquez Becerra C (2017) Wood preservatives and microbial exudates with antagonistic activity against biological agents. *Revista Mexicana de Fitopatología* 36(1):56-78. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.1704-2>

International Organization for Standardization (2014a) ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Wood. Determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization, Geneva. <https://www.iso.org/standard/60063.html>

International Organization for Standardization (2014b) ISO 13061-2:2014. Wood - Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization, Geneva. <https://www.iso.org/standard/60064.html>

Jirouš-Rajković V, Miklečić J (2021) Enhancing Weathering Resistance of Wood—A Review. *Polymers* 13(12):1980. <https://doi.org/10.3390/polym13121980>

Jørgensen LN, Heick TM (2021) Azole Use in Agriculture, Horticulture, and Wood Preservation – Is It Indispensable? *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology* 11:730297. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2021.730297>

Lee H-M, Son D-W, Lee H-S, Hwang W-J (2015) Influence of Copper Azole Retention Level to Wood Decay. *Journal of the Korean Wood Science Technology* 43(1):112-121. <http://dx.doi.org/DOI:10.5658/WOOD.2015.43.1.112>

Lee D-h, Lee MJ, Son D-W, Park B-D (2006) Adhesive performance of woods treated with alternative preservatives. *Wood Science and Technology* 40:228-236. <https://doi.org/10.1007/s00226-005-0036-7>

Lowden LA, Hull TR (2013) Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Science Reviews* 2:4. <https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-4>

Mensah RA, Jiang L, Renner JS, Xu Q (2023) Characterisation of the fire behaviour of

wood: From pyrolysis to fire retardant mechanisms. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 148:1407-1422.

<https://doi.org/10.1007/s10973-022-11442-0>

Moya R, Gaitán J, Berrocal A (2021) Guía para la preservación de madera por el método de inmersión – difusión con sales de boro. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.

Niklas KJ, Spatz HC (2010) Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. *American Journal of Botany* 97(10):1587-1594.

<http://dx.doi.org/10.3732/ajb.1000150>

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE) (1999) Norma Mexicana NMX-C-410-ONNCCE-1999. Industria de la construcción. Vivienda de madera. Retención y penetración de sustancias preservadoras en madera. Métodos de prueba. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE) (2001) Norma Mexicana NMX-C-178-ONNCCE-2001. Industria de la construcción-Preservadores para madera-Clasificación y requisitos. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE) (2014) NMX-C-322-ONNCCE-2014. Industria de la Construcción. Madera Preservada a presión. Clasificación y Requisitos. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.

Pánek M, Kubovský I, Oberhofnerová E, Štěrbová I, Niemz P, Osvald A, Kačík F (2021) Influence of natural weathering on the ignition and relative burning rate of selected softwoods. *Construction and Building Materials* 304:124615.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124615>

Pereira EE, Mota A, Cabral J, Campos T, Chaves MD, Benigno J (2017) Influence of boron compounds on the physical properties of Eucalyptus sp. wood. *Scientia Forestalis* 45:197-204.

<https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.09>

Pinto EM, Machado GO, Felipetto RPF, Christoforo AL, Lahr FAR, Calil Jr. C (2016) Thermal Degradation and Charring Rate of *Corymbia Citriodora* and *Eucalyptus Grandis* Wood Species. *TOpen Construction and Building Technology Journal* 10(8):450-456.

<https://doi.org/10.2174/187483680161001045>

Q

Presley G, Cappellazzi J, Eastin I (2022) Durability of Thermally Modified Western Hemlock Lumber Against Wood Decay Fungi. *Frontiers in Forests and Global Change* 5:813080.

<https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.813080>

Ragan B, Kačíková D, Paulduro M (2016) Influence of physical and chemical characteristics of selected tree species on mass loss and rate of burning after exposure to radiant heating. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen* (58):121-131.

<https://doi.org/10.17423/afx.2016.58.2.13>

Rendón A, Dorantes F, Mejía S, Alamilla L (2021) Características macroscópicas, propiedades y usos de la madera de especies nativas y exóticas en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.

Rocha MA, Landesmann A (2016) Combustion properties of Brazilian natural wood species. *Fire and Materials* (40):219-228. <https://doi.org/10.1002/fam.2281>

Shen D, Xiao R, Fang M, Chow W (2013) Thermal-balanced integral model for pyrolysis and ignition of wood. *Korean Journal of Chemical Engineering* 30(1):228-234.

<https://doi.org/10.1007/s11814-012-0098-9>

Silva Guzmán JA, Fuentes Talavera FJ, Rodríguez Anda R, Torres Andrade PA, Lomelí Ramírez MA, Ramos Quirarte J, Waitkus C, Richter HG (2010) Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas se México e importadas. Comisión

Artículos

- Nacional Forestal, México.
Simsek H, Baysal E, Yilmaz M, Culha F (2013) Some mechanical properties of wood impregnated with environmentally-friendly boron and copper based chemicals. *Wood Research* (58):495-504.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.028>
- Sotomayor Castellanos JR, Ávila Calderón LEA (2019) Retención y penetración de sales de Boro en tres maderas Angiospermas: *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* y *Albizia plurijuga*. *Ciencia y Tecnología UTEQ* 12(2):23-31.
<https://doi.org/10.18779/cyt.v12i2.323>
- Sotomayor Castellanos JR, Ávila Calderón LEA (2021) Reacción al Fuego de Tres Maderas Angiospermas Impregnadas con Sales de Boro. *Revista Tecnológica - Espol* 33(1):14.
<http://www.rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/818>
- Sotomayor Castellanos JR, Gallegos León G (2018) Reacción al fuego de madera sólida y laminada de *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* y *Juniperus pyriformis*. Estudio comparativo. *Investigación e Ingeniería de la Madera* 14(1):39-78.
https://www.researchgate.net/publication/324830505_Reaccion_al_fuego_de_madera_solid_a_y_laminada_de_Enterolobium_cyclocarpum_Tabebuia_rosea_y_Juniperus_pyriformis_Estudio_comparativo
- Sotomayor Castellanos JR, Adachi K, Makovická Osvaldová L (2024) Reaction to Fire of Eight Species of Densified Mexican Wood. In: Makovická Osvaldová L, Hasburgh LE, Das O (eds). *Wood & Fire Safety 2024*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-59177-8_3
- Tamarit Urias JC, López Torres JL (2007) Xilotecología de los principales árboles tropicales de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, México.
- Teng T-J, Mat Arip MN, Sudesh K, Nemoikina A, Jalaludin Z, Ng E-P, Lee H-L (2018) Conventional technology and nanotechnology in wood preservation: A Review. *Bioresources* 13(4):9220-9252.
<https://doi.org/10.15376/biores.13.4.Teng>
- Wegner T, Skog KE, Ince PJ, Michler, CJ (2010) Uses and Desirable Properties of Wood in the 21st Century. *Journal of Forestry* 108(4):165-173.
<https://research.fs.usda.gov/treesearch/37439>
- Xu QF, Chen LZ, Harries KA, Zhang FW, Liu Q, Feng JH (2015) Combustion and charring properties of five common constructional wood species from cone calorimeter tests. *Construction and Building Materials* (96):416-427.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.062>
- Yu C, Crump D, Brown V (2009) Exposure Risk Assessment of the Emissions of Wood Preservative Chemicals in Indoor Environments. *Clean* 37(6):466-474.
<https://doi.org/10.1002/clean.200900046>
- Yuksel M, Baysal E, Toker H (2014) Combustion characteristics of oriental beech wood impregnated with commonly used borates. *Wood Research* 59(1):39-50.
<http://www.woodresearch.sk/intro.ph>