

# **R**eacción a la exposición al fuego de las maderas *Thuja plicata* Marshall y *Acer saccharum* L.

*Javier Ramón Sotomayor Castellanos y Gerardo Gallegos León*

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, UMSNH

## **Resumen**

En la presente investigación se establecieron la densidad de la madera, el tiempo de ignición, la pérdida de masa y su velocidad; determinados en probetas de pequeñas dimensiones de las especies *T. plicata* y *A. saccharum*. Estos resultados se compararon con datos de maderas mexicanas divulgados recientemente. Se determinaron la densidad aparente de la madera y su contenido de humedad. Además, se realizaron pruebas de reacción al fuego y se determinó el tiempo de ignición, la pérdida de masa y la velocidad de la pérdida de masa. Las pruebas de reacción al fuego permitieron determinar el tiempo de ignición de la madera, la pérdida de masa y su velocidad para las maderas *T. plicata* y *A. saccharum*. La mayor densidad de *A. saccharum* produjo que el tiempo de ignición fuera mayor, comparativamente con el de *T. plicata*. Por el contrario, la pérdida de masa y su velocidad fueron menores, de tal forma que, estadísticamente, los resultados de cada especie se diferenciaron. Las magnitudes de los parámetros determinados en *T. plicata* y *A. saccharum* son similares a los de maderas mexicanas reportadas en trabajos anteriores. Igualmente, la reacción al fuego en las especies *T. plicata* y *A.*

*saccharum* siguió también las mismas tendencias para tiempos de exposición análogos a otras investigaciones recientes.

**Palabras clave:** Densidad de la madera, tiempo de ignición, pérdida de masa, velocidad de la pérdida de masa, pruebas de reacción al fuego.

## Abstract

In the present investigation the density of the wood, the time of ignition, the loss of mass and its speed were determined through small samples of *T. plicata* and *A. saccharum*. Likewise, the results were compared with data from mexican woods recently published. The apparent density of the wood and its moisture content were determined. Fire reaction tests were performed. This way, the ignition time, mass loss and speed of mass loss were determined. The fire reaction tests allowed to determine the time of ignition of the wood, the loss of mass and its speed for the wood species *T. plicata* and *A. saccharum*. The higher density of *A. saccharum* produced that the ignition time was greater compared to that of *T. plicata*. On the contrary, the loss of mass and its speed were lower. Also, statistically, the results of each species were differentiated. The magnitudes of the parameters used in *T. plicata* and *A. saccharum* are similar to those of mexican woods reported in previous works. Likewise, the reaction to fire in *T. plicata* and *A. saccharum* also followed the same trends for exposure times, related with other recent investigations.

**Keywords:** Wood density, ignition time, mass loss, speed of mass loss, fire reaction tests.

## Introducción

La madera es un material combustible con numerosas aplicaciones en productos de uso cotidiano como son: muebles, artículos deportivos y utensilios de cocina. Por otra parte, la madera tiene aplicaciones especializadas como por ejemplo, la fabricación de tableros y de elementos estructurales para edificaciones. Por tal razón es necesario y relevante conocer cómo reacciona la madera cuando es expuesta al fuego. En la literatura se reporta información respecto de las especies tropicales de maderas (Njankouo *et al.*, 2005, Hugi *et al.* 2007, Giraldo *et al.*, 2016); acerca de normas para su caracterización en lo referente al fuego (ISO, 2012; ASTM International, 2108), así como reglamentos para su cumplimiento cuando se construye con madera (Lennon *et al.*, 2000, Cachim y Franssen, 2010, Aseeva *et*

*al.*, 2014). Para el caso de México, no obstante, son pocas las referencias sobre estos tópicos.

A manera de síntesis, se puede argumentar que la densidad aparente, el tiempo de ignición y la pérdida de masa, son parámetros indicadores útiles para la caracterización tecnológica de la madera. Esto se respalda a partir de los trabajos anteriormente citados, los cuales tienen relación con las pruebas de reacción en la exposición de la madera al fuego.

La densidad aparente de la madera es la característica física que se utiliza para su categorización relativa entre especies e intra-especies (Chave *et al.* 2006, Sotelo *et al.* 2017). En tecnología de la madera la densidad aparente se emplea como predictor de su resistencia mecánica (Niklas y Spatz, 2010). Asimismo, este parámetro físico es un indicador de la reacción de la madera al fuego (Kuznetsov y Fil'kov, 2011, De Freitas y Landesmann, 2016).

El tiempo de ignición es el lapso requerido para establecer 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, cuanto más corto sea el tiempo de ignición, más inflamable será el material (Boonmee y Quintiere, 2002, Xu *et al.*, 2015).

La exposición de una pieza de madera al fuego y su consecuente pérdida de masa, puede servir como indicador de la capacidad de una especie para su empleo en estructuras y productos confeccionados con este material. La literatura sobre el comportamiento de la madera expuesta al fuego reporta que la pérdida de masa es proporcional a la densidad de la madera (Friquin, 2011, Rocha y Landesmann, 2016), por lo tanto, se puede observar esta tendencia al examinar maderas con densidades diferentes.

La velocidad en la pérdida de masa de la madera es inversamente proporcional a su densidad aparente, la cual también depende del contenido de humedad, la especie, la composición química y las dimensiones de la pieza de madera (Friquin, 2011). Debido a que la carbonización implica la degradación térmica en la masa de la madera, la velocidad de combustión es más lenta cuando hay más materia que degradar. Consecuentemente, se puede estimar la velocidad de combustión con el cociente entre la cantidad de masa perdida y el tiempo de exposición (Osvaldová *et al.*, 2016).

*Reacción a la exposición al fuego de las maderas Thuja plicata Marshall y Acer saccharum L.*

---

Las pruebas de reacción al fuego evalúan la capacidad de un material para favorecer o retardar el desarrollo de un incendio, e indican si el mismo es combustible o incombustible. Cabe señalar que el concepto de reacción al fuego no debe confundirse con el de resistencia al fuego, que se refiere a la evaluación del tiempo durante el cual un elemento constructivo es capaz de cumplir la función para la que ha sido instalado. En la resistencia al fuego se analizan la capacidad portante, integridad y aislamiento del material (AENOR internacional, 2010).

Autores como Babrauskas (2005), Chung (2010) y Xu et al. (2015), proponen un protocolo experimental *ad-hoc* con probetas de pequeñas dimensiones y en condiciones de solicitación controladas. Dichos antecedentes sirven para desarrollar el argumento principal respecto a la realización de pruebas de reacción al fuego: “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 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” (Sotomayor y Carrillo, 2017).

Se puede consultar información sobre las características anatómicas de *T. plicata* y *A. saccharum* por medio de la base de datos *InsideWood* (Wheeler, 2011), publicada en la página de la red de la Asociación Internacional de Anatomistas de la Madera: <http://insidewood.lib.ncsu.edu/welcome>. En ese sentido, datos relacionados con las características tecnológicas de la madera de las especies en estudio, puede ser consultada en el Manual de la Madera, publicado por el Laboratorio de Productos Forestales de los Estados Unidos de América (Forest Products Laboratory, 2017).

El duramen de la madera de *T. plicata* presenta una escala de tonalidades que van del rojizo y rosado marrón, al marrón apagado. Por su parte, la albura cuenta con una tonalidad casi blanca; y es estrecha en sus dimensiones, ya que a menudo presenta no más de 3 centímetros de ancho. La madera es generalmente de grano recto, presenta una textura uniforme pero bastante gruesa y tiene muy baja contracción. Esta especie es liviana, moderadamente blanda y de bajo aguante cuando se utiliza como una viga o poste; también cuenta con una baja resistencia a los golpes. El duramen es muy resistente a la descomposición. La especie *T. plicata* se usa principalmente para tablillas, madera aserrada, postes y pilas. Esta madera sirve también para revestimientos exteriores, terrazas, carpintería interior, construcción de barcos y embarcaciones, así como cajas y puertas (Forest Products Laboratory, 2017).

Reacción a la exposición al fuego de las maderas *Thuja plicata* Marshall y *Acer saccharum* L.

El duramen de la madera en la especie *A. saccharum* suele ser de color marrón rojizo claro, pero a veces considerablemente más oscuro. La albura es comúnmente blanca con un leve tinte marrón rojizo. Por lo general mide entre 8 y 12 centímetros de ancho. La especie *A. saccharum* tiene una textura fina y uniforme. Es pesado, duro y resistente a los golpes; asimismo, tiene una alta contracción. El grano de *A. saccharum* generalmente es recto y a menudo se selecciona para muebles o artículos novedosos. El *A. saccharum* se usa principalmente para madera y chapas. Sin embargo, una gran proporción se utiliza también para fabricar pisos, muebles, armarios, pianos, mesas de billar, manijas, pisos de baile y gimnasio, carretes y bobinas (Forest Products Laboratory, 2017).

Estas dos especies se distinguen entre sí por la gran diferencia en su densidad aparente: *T. plicata*  $\rho_{CH} = 353 \text{ kg m}^{-3}$  y *A. saccharum*  $\rho_{CH} = 688 \text{ kg m}^{-3}$  (Sotomayor y Villaseñor, 2016). Esta propiedad permite la comparación entre sus características físicas, así como las de otras especies, con un amplio intervalo de densidades.

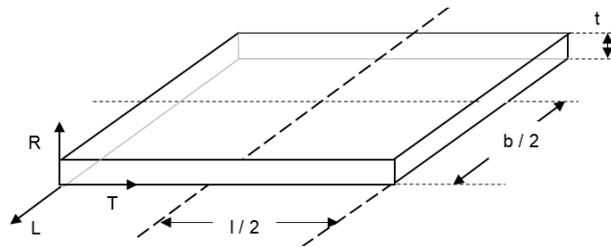
Dos hipótesis de trabajo sirven de guía para la investigación: 1. La densidad aparente de la madera, el tiempo de ignición y la pérdida de masa, son diferentes para las maderas de *T. plicata* y *A. saccharum*; 2. Las magnitudes de estos parámetros son cercanas a las de maderas mexicanas reportadas en la bibliografía.

Se han desarrollado protocolos sencillos para el estudio de la reacción al fuego de especies de maderas endémicas del país. Esto por medio del Laboratorio de Mecánica de la Madera, que forma parte de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, México. Los parámetros determinados son el tiempo de ignición, la pérdida de masa y la velocidad de la pérdida de masa. Sin embargo, queda la duda sobre cómo se posicionan los datos de las especies mexicanas en comparación a los de especies extranjeras, como es el caso de *T. plicata* y *A. saccharum*.

El objetivo de la investigación fue comparar la densidad aparente de la madera, el tiempo de ignición, la pérdida de masa y la velocidad de la pérdida de masa. Utilizando la reciente divulgación de los datos de estos parámetros para el caso de maderas mexicanas, dichas medidas fueron determinadas a partir de dos maderas nativas de Norteamérica: *T. plicata* y *A. saccharum*.

## Materiales y métodos

El material experimental fue el utilizado por Sotomayor y Villaseñor (2016). Se recolectaron 20 piezas de madera de *Acer saccharum* Marshall y 20 de *Thuja plicata* L., con dimensiones de 0,04 m de espesor por 0,20 m de ancho y 0,4 m de largo; alineadas de tal forma que las dimensiones correspondieron a las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. La madera fue acondicionada durante 4 años en una cámara con una temperatura de 20 °C ( $\pm 2$  °C) y una humedad relativa del aire de 65 % ( $\pm 2$  %), hasta que su peso fue constante. Las piezas de madera fueron recortadas en probetas de forma cuadrada con dimensiones de 0,085 m de lado y espesor de 0,015 m (Figura 1).



**Figura 1.** Diagrama de las pruebas de vibraciones en torsión. R: dirección radial (t: espesor); T: dirección tangencial (l: largo); L: dirección longitudinal (b: ancho) (Sotomayor y Villaseñor, 2016).

El contenido de humedad de la madera se calculó por el método de diferencia de pesos según la norma ISO 13061-1:2014 (International Organization for Standardization, 2014a). El contenido de humedad de la madera se calculó con la fórmula (1):

$$CH = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

CH = Contenido de humedad (%)

P<sub>1</sub> = Peso de la probeta al momento del ensayo (kg)

P<sub>2</sub> = Peso de la probeta en estado anhidro (CH ≈ 0 %) (kg)

*Reacción a la exposición al fuego de las maderas Thuja plicata Marshall y Acer saccharum L.*

---

La densidad aparente de la madera al momento del ensayo se determinó de acuerdo con la norma ISO 13061-2:2014 (International Organization for Standardization, 2014b). La densidad aparente de la madera se calculó con la fórmula (2):

$$\rho_{CH} = \frac{P_1}{V_1} \quad (2)$$

Donde:

$\rho_{CH}$  = Densidad aparente para un contenido de humedad CH ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$P_1$  = Peso de la probeta al momento del ensayo (kg)

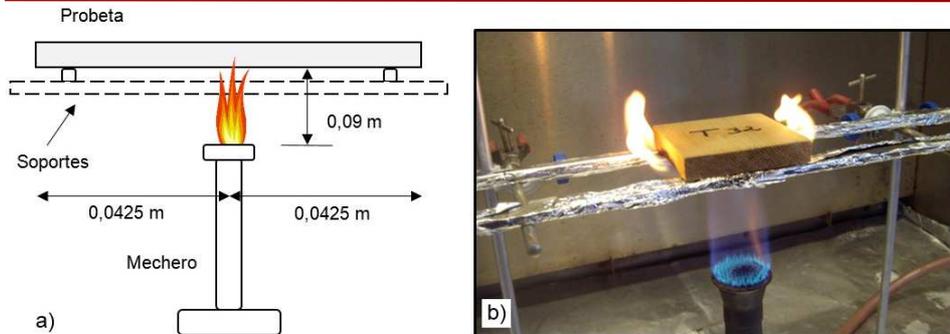
$V_1$  = Volumen de la probeta al momento del ensayo ( $\text{m}^3$ )

Las pruebas de reacción al fuego adaptaron el protocolo propuesto por Sotomayor y Gallegos (2018). Para este estudio de caso, se preparó un dispositivo de ensayo que consistió en un mechero de gas y dos soportes para las probetas (Figuras 2a y 2b). Entre los soportes se posicionó la probeta de forma que la llama del mechero impactara en la dirección transversal de esta.

La rutina de laboratorio implementada para las pruebas de reacción consistió en las siguientes etapas:

1. Se midieron el peso y las dimensiones de las probetas. Se formaron seis grupos de cinco probetas cada uno, destinados a cinco tiempos de exposición: 30, 60, 90, 120, 150, 180 segundos.
2. La probeta se posicionó en el dispositivo para las pruebas de reacción al fuego (Figuras 2a y 2b). La orientación fue en dirección radial, coincidiendo con el flujo vertical de la flama.
3. De acuerdo con el grupo al que correspondía, cada probeta se expuso durante 30, 60, 90, 120, 150 y 180 segundos al flujo incidente de calor producido por la flama de 9 cm de altura (Čekovská *et al.*, 2017). Esta flama fue obtenida por medio de un mechero de laboratorio tipo *Meker-Fisher* con regulación de aire y de gas, con quemador de 0,03 m de diámetro y temperatura máxima de 1300 °C.

*Reacción a la exposición al fuego de las maderas Thuja plicata Marshall y Acer saccharum L.*



**Figura 2.** Pruebas de reacción al fuego: a) Diagrama; b) Fotografía.

4. Se midió el tiempo necesario para que apareciera la ignición en forma de flama en, por lo menos, las tres caras de la probeta que fueron expuestas al flujo de calor.
5. Transcurrido el tiempo de exposición (30, 60, 90, 120, 150 y 180 segundos), la probeta se retiró de la flama y se paró su combustión en una cama de arena.
6. La masa de madera carbonizada de la probeta se retiró y se midió el peso de la misma después de su exposición al fuego.

La pérdida de masa de la probeta ocasionada por la exposición al fuego se calculó con la fórmula (3) (Yuksel *et al.*, 2014):

$$\Delta m = \left( \frac{P_a - P_d}{P_a} \right) \times 100 \quad (3)$$

Donde:

$\Delta m$  = Pérdida de masa (%)

$P_{at}$  = Peso de la probeta antes de la exposición al fuego (kg)

$P_{dt}$  = Peso de la probeta después de la exposición al fuego (kg)

La velocidad de pérdida de masa ocasionada por la exposición al fuego se calculó con la fórmula (4) (Čekovská *et al.*, 2017):

$$v\Delta m = \left( \frac{\Delta m}{t} \right) \quad (4)$$

Donde:

$v\Delta m$  = Velocidad de pérdida de masa ( $\text{kg s}^{-1}$ )

$\Delta m$  = Pérdida de masa (%)

$t$  = Tiempo de exposición (s)

Se diseñaron dos experimentos en donde las variables de respuesta fueron: la densidad aparente ( $\rho_{CH}$ , fórmula 2), el tiempo de ignición ( $t_{ign}$ ) y la pérdida de masa ( $\Delta m$ , fórmula 3). Dichas variables se agruparon en tres pares de muestras independientes, donde el factor de variación fue la especie: *T. plicata* versus *A. saccharum*.

El primer experimento tuvo como objetivo verificar la hipótesis uno. Para ello, se realizaron pruebas de normalidad para las distribuciones de las muestras, calculando su sesgo estandarizado (SE) y su apuntamiento estandarizado (AE). Se llevaron a cabo pruebas de diferencias de medias para un nivel de confianza del 95%. La hipótesis nula  $H_0: \bar{x}_{tp} - \bar{x}_{ac} = 0$  se contrastó con la hipótesis alterna  $H_0: \bar{x}_{tp} - \bar{x}_{ac} \neq 0$  donde  $\bar{x}_{tp}$  se refiere a las medias de las muestras de *T. plicata* y  $\bar{x}_{ac}$  para las de *A. saccharum*. El parámetro de velocidad de pérdida de la masa ( $v\Delta m$ , fórmula 4) se consideró como una variable derivada.

El segundo experimento se enfocó en verificar la hipótesis dos. Empleando datos de la bibliografía (Sotomayor y Carrillo, 2017, Sotomayor y Giraldo, 2017, Sotomayor y Gallegos, 2018), se calcularon las regresiones lineales y sus coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de las variables  $t_{ign}$ ,  $\Delta m$  y  $v\Delta m$  en función de la densidad aparente ( $\rho_{CH}$ ). De esta manera los resultados de esta investigación se posicionaron en relación a estas regresiones.

## Resultados y discusión

La densidad aparente de *A. saccharum* es 93% mayor que la de *T. plicata*. El tiempo de ignición de *A. saccharum* es 118% mayor que el de *T. plicata*. En cambio, de acuerdo con los resultados obtenidos en los seis tiempos de exposición, la pérdida de masa de *A. saccharum* es en promedio 42% menor que la de *T. plicata*. Igualmente, la diferencia de la velocidad de la pérdida de masa de *A. saccharum* en comparación con la de *T. plicata* es proporcionalmente menor (Tabla 1).

**TABLA 1**  
Tiempo de exposición, densidad aparente, tiempo de ignición, pérdida de masa y velocidad de la pérdida de masa.

$t_{exp}$ (s)	$\rho_{CH}$ (kg m <sup>-3</sup> )	$t_{ign}$ (s)	$\Delta m$ (%)	$v\Delta m$ (kg s <sup>-1</sup> x 10 <sup>-3</sup> )
<i>T. plicata</i>				
30	383	14,0	3,9	0,129
60	352	12,6	10,2	0,170
90	370	13,0	14,1	0,157
120	333	13,0	17,6	0,146
150	340	14,0	19,8	0,132
180	343	14,4	20,8	0,116
$\bar{x}$	354	13,5	-	-
$\sigma$	20	0,7	-	-
CV	5,5	5,4	-	-
<i>A. saccharum</i>				
30	708	28,8	1,3	0,043
60	677	27,0	4,8	0,081
90	665	29,6	8,5	0,094
120	675	28,4	11,3	0,094
150	699	31,2	12,6	0,084
180	668	31,6	16,6	0,092
$\bar{x}$	682	29,4	-	-
$\sigma$	17	1,7	-	-
CV	2,5	5,9	-	-

$t_{exp}$  = Tiempo de exposición;  $\rho_{CH}$  = Densidad aparente;  $t_{ign}$  = Tiempo de ignición;  $\Delta m$  = Pérdida de masa;  $v\Delta m$  = Velocidad de la pérdida de masa.

Los resultados del análisis estadístico (Tabla 2) verifican la normalidad en las distribuciones de todas las muestras. Además confirman que existe una diferencia significativa entre  $\rho_{CH}$ ,  $t_{ign}$  y  $\Delta m$  ( $P_{(\alpha = 0,05)} < 0,001$ ) para las maderas de *T. plicata* y *A. saccharum*.

**TABLA 2**  
Resultados del análisis estadístico.

Especie	SE	AE	P <sub>(α = 0,05)</sub>
$\rho_{CH}$ <i>T. plicata</i>	0,3958	1,5816	-
$\rho_{CH}$ <i>A. saccharum</i>	-0,6339	-0,7823	-
$\rho_{CH}$ <i>T. plicata</i> vs. $\rho_{CH}$ <i>A. saccharum</i>	-	-	< 0,001
$t_{ign}$ <i>T. plicata</i>	-0,6552	0,2942	-
$t_{ign}$ <i>A. saccharum</i>	1,2514	0,7817	-
$t_{ign}$ <i>T. plicata</i> vs. $t_{ign}$ <i>A. saccharum</i>	-	-	< 0,001
$\Delta m$ <i>T. plicata</i>	-1,2274	-0,9306	-
$\Delta m$ <i>A. saccharum</i>	-0,0155	-1,1416	-
$\Delta m$ <i>T. plicata</i> vs. $\Delta m$ <i>A. saccharum</i>	-	-	< 0,001

$\rho_{CH}$  = Densidad aparente;  $t_{ign}$  = Tiempo de ignición;  $\Delta m$  = Pérdida de masa; SE= Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; P<sub>(α = 0,05)</sub> = Valor P para un nivel de confianza del 95%.

Para ilustrar esta diferencia la Figura 3 presenta, para los valores promedio correspondientes a los seis tiempos de exposición, el tiempo de ignición (Figura 3a), la pérdida de masa (Figura 3b) y la velocidad de la pérdida de masa (Figura 3c) en función de la densidad aparente. Se observa cómo los datos se agrupan y en el caso del tiempo de ignición aumentan. Por el contrario, la pérdida de masa y su velocidad tienden a disminuir.

Las tendencias respecto del tiempo de ignición, de la pérdida de masa y de su velocidad en función del tiempo de exposición, se detallan en la Figura 4. El tiempo de ignición se mantuvo constante (Figura 4a). En cambio la pérdida de masa se incrementó a medida que la madera fue expuesta de manera prolongada (Figura 4b). Las magnitudes de estos dos resultados denotan diferencias entre las dos maderas estudiadas; es decir, el tiempo de ignición de *A. saccharum* es mayor que el de *T. plicata*. En un sentido opuesto, la pérdida de masa es mayor para el caso de *T. plicata* en comparación con la de *A. saccharum*.

Si bien las magnitudes correspondientes a *T. plicata* son mayores que las de *A. saccharum*, las tendencias en cuanto a sus velocidades mostraron un aspecto particular respecto del tiempo de ignición y la pérdida de masa. En efecto, mientras que el tiempo de ignición y la pérdida de masa aumentan a medida que el tiempo

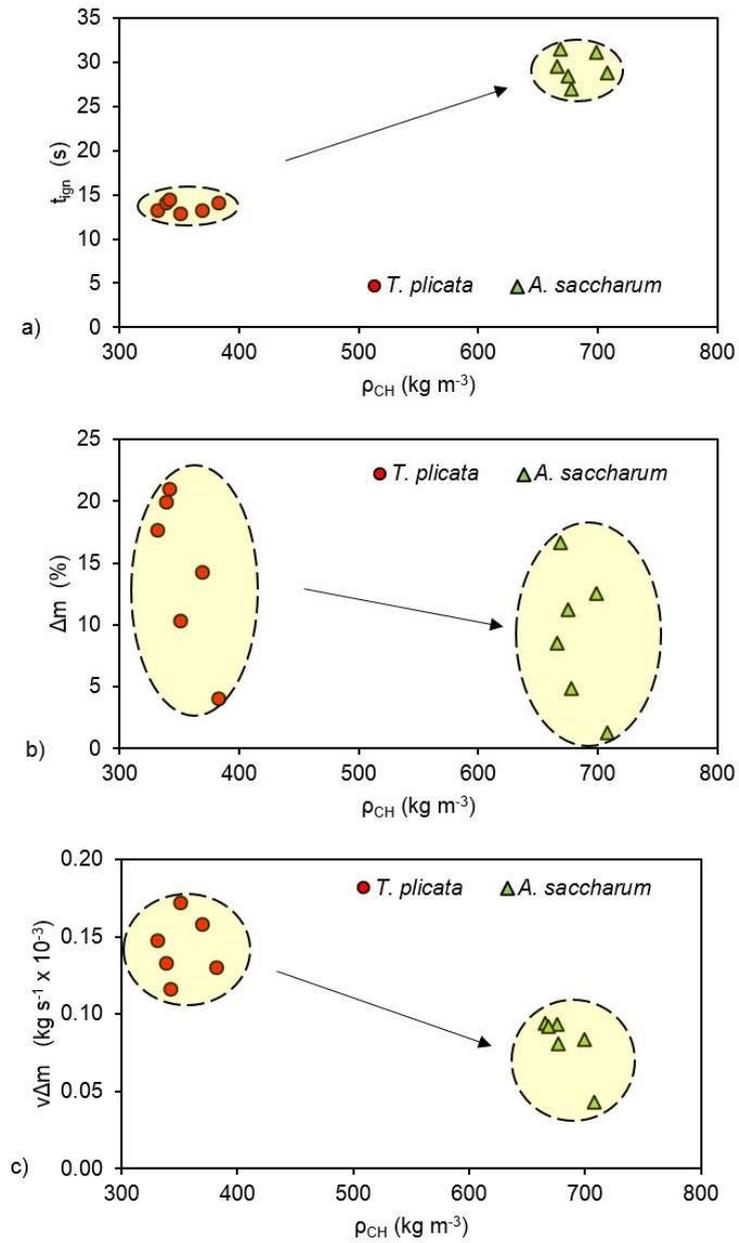


Figura 3. a) Tiempo de ignición ( $t_{ign}$ ), b) pérdida de masa ( $\Delta m$ ) y c) velocidad de la pérdida de masa ( $v\Delta m$ ); en función de la densidad aparente ( $\rho_{CH}$ ).

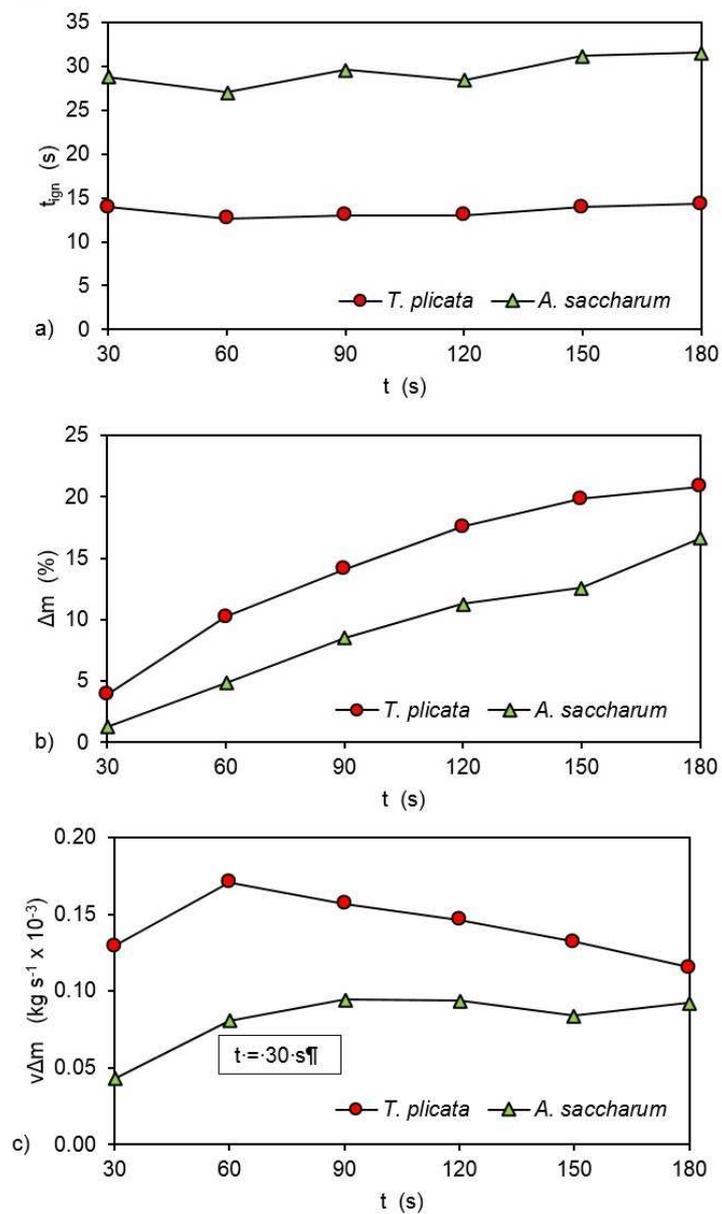


Figura 4. a) Tiempo de ignición ( $t_{ign}$ ), b) pérdida de masa ( $\Delta m$ ) y c) velocidad de la pérdida de masa ( $v\Delta m$ ); en función del tiempo de exposición (t).

Reacción a la exposición al fuego de las maderas *Thuja plicata* Marshall y *Acer saccharum* L.

transcurre, la velocidad de la pérdida de masa se incrementa hasta un tiempo de exposición de 60 segundos (Figura 4c). Este lapso marca un punto de inflexión a partir del cual la velocidad disminuye. Dicho fenómeno se observa para las dos especies, que sólo se diferencian por su magnitud, siendo la velocidad de *T. plicata* superior a la de *A. saccharum*.

Los argumentos anteriores sugieren que las maderas de *T. plicata* y *A. saccharum* se comportan de manera diferencial desde el punto de vista estadístico y de su reacción al fuego. Este resultado sirve para verificar la primera hipótesis de trabajo. En efecto, la densidad aparente de la madera, el tiempo de ignición, la pérdida de masa y su velocidad, son diferentes en sus magnitudes y en sus tendencias cuando estas maderas son expuestas al fuego. La Figura 5 muestra de manera gráfica este argumento. Por lo tanto, se observa que a medida que el tiempo de exposición aumenta, la madera pierde más masa. Asimismo, esta cantidad es diferente entre las dos especies.

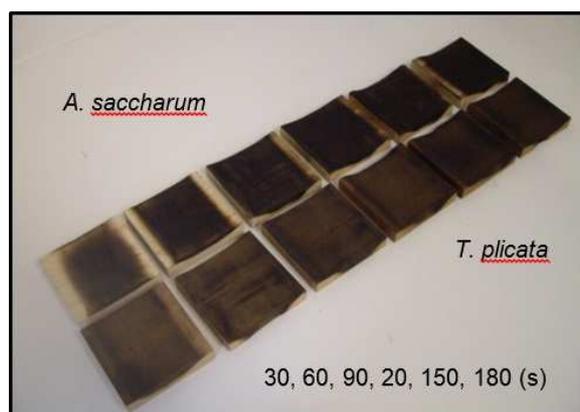
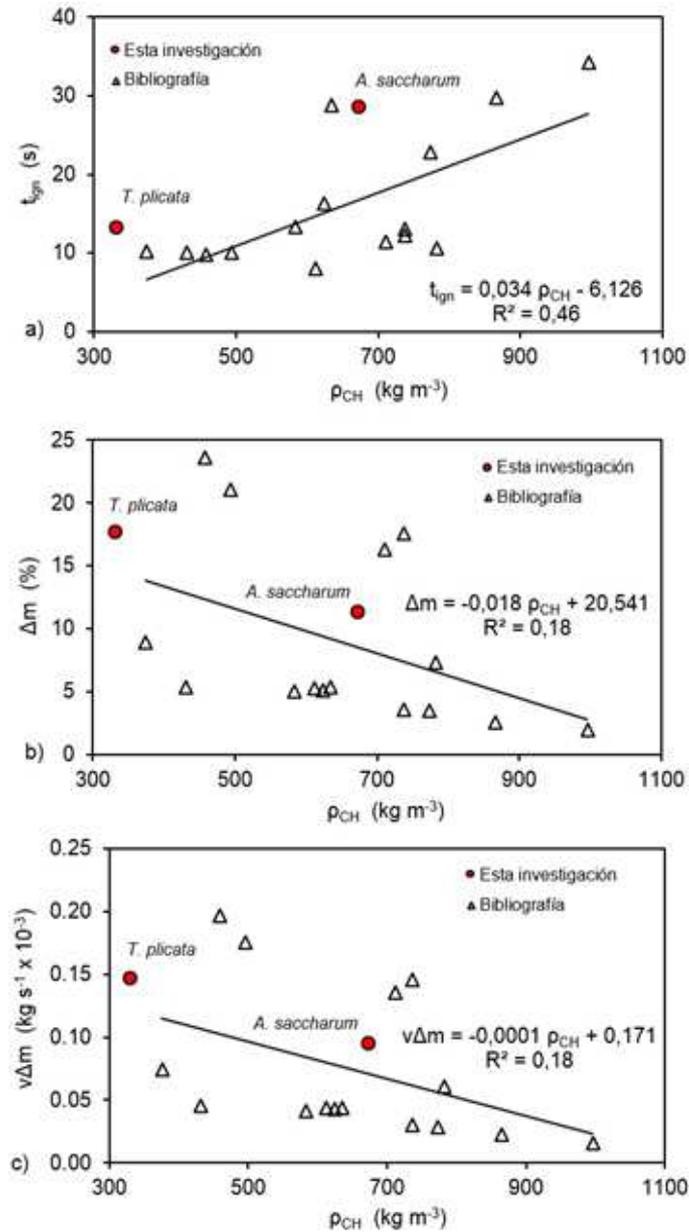


Figura 5. Probetas de *T. plicata* y *A. saccharum* después de su exposición al fuego.

Respecto al posicionamiento de los parámetros medidos en *T. plicata* y *A. saccharum*, en comparación con los resultados de maderas mexicanas, la Figura 6 presenta el tiempo de ignición, la pérdida de masa y la velocidad de la pérdida de masa en función de la densidad aparente. Este análisis se detalla para los resultados de esta investigación y se contrasta con datos de la bibliografía (Sotomayor y Carrillo, 2017, Sotomayor y Giraldo, 2017, Sotomayor y Osvaldová, 2017, Sotomayor y Gallegos, 2018) presentados en la Tabla 3.



**Figura 6.** a) Tiempo de ignición ( $t_{ign}$ ), b) pérdida de masa ( $\Delta m$ ), y c) velocidad de la pérdida de masa ( $v\Delta m$ ); en función de la densidad aparente ( $\rho_{CH}$ ). Datos utilizados para los resultados de esta investigación y los de la bibliografía.

**TABLA 3**

Densidad aparente, tiempo de ignición, pérdida de masa y velocidad de la pérdida de masa (datos contenidos en la bibliografía).

C	Material y especie	$\rho_{CH}$ (kg m <sup>-3</sup> )	$t_{ign}$ (s)	$\Delta m$ (s)	$v\Delta m$ (kg s <sup>-1</sup> x 10 <sup>-3</sup> )
Sotomayor y Carrillo (2017)					
1	Madera sólida <i>T. rosea</i>	613	8,0	5,29	0,044
2	Madera sólida <i>A. inermis</i>	737	12,3	3,59	0,030
3	Madera sólida <i>J. pyriformis</i>	773	22,9	3,48	0,029
4	Madera sólida <i>Quercus spp.</i>	866	29,9	2,64	0,022
5	Madera sólida <i>C. elaeagnoides</i>	996	34,4	1,96	0,016
Sotomayor y Giraldo (2017)					
6	Madera sólida <i>G. americanus</i>	375	10,3	9,00	0,075
7	Madera densificada <i>G. americanus</i>	783	10,6	7,30	0,061
Sotomayor y Osvaldová (2017)					
8	Madera sólida <i>A. religiosa</i>	431	10,0	5,40	0,045
9	Madera laminada combinada	582	13,3	5,00	0,042
Sotomayor y Gallegos (2018)					
10	Madera sólida <i>E. cyclocarpum</i>	458	9,8	23,67	0,197
11	Madera laminada <i>E. cyclocarpum</i>	494	10,1	21,01	0,175
12	Madera sólida <i>T. rosea</i>	624	16,4	5,10	0,043
13	Madera laminada <i>T. rosea</i>	635	28,9	5,33	0,044
14	Madera sólida <i>J. pyriformis</i>	711	11,5	16,32	0,136
15	Madera laminada <i>J. pyriformis</i>	737	13,0	17,57	0,146

C = Código;  $\rho_{CH}$  = Densidad aparente;  $t_{ign}$  = Tiempo de ignición;  $\Delta m$  = Pérdida de masa;  $v\Delta m$  = Velocidad de la pérdida de masa.

De acuerdo con los datos de la bibliografía, la correlación lineal  $t_{ign} = f(\rho_{CH})$  indica que el tiempo de ignición aumenta proporcionalmente a la densidad de la madera (Figura 6a); no obstante que la regresión obtuvo un coeficiente de determinación débil ( $R^2 = 0,46$ ). Efectivamente,  $t_{ign}$  de *T. plicata* ( $\rho_{CH} = 354 \text{ kg m}^{-3}$ ) se posiciona en la parte inferior de la escala. En cambio,  $t_{ign}$  de *A. saccharum* se posiciona,

proporcionalmente a su densidad ( $\rho_{CH} = 682 \text{ kg m}^{-3}$ ), en la parte superior de la tendencia. Por lo tanto las magnitudes de las especies aquí estudiadas siguen la tendencia de proporcionalidad respecto a la densidad aparente de la madera y sus magnitudes son similares a las reportadas en la bibliografía sobre especies con densidades aparentes similares.

En el mismo contexto la correlación de la pérdida de masa en función de la densidad aparente fue calculada empleando los datos de la bibliografía (Figura 6b). Se sugiere que el  $\Delta m$  disminuye a medida que la densidad aparente de la madera aumenta, siempre con un coeficiente de determinación muy débil ( $R^2 = 0,18$ ). En este sentido, los resultados concernientes a *T. plicata* y *A. saccharum* son congruentes con esta tendencia. En efecto, a menor densidad de la madera de *T. plicata* corresponde una mayor pérdida de masa. Y a medida que aumenta la densidad, como es el caso de *A. saccharum*, la pérdida de masa disminuye.

El cálculo de la velocidad de la pérdida de masa (Fórmula 4) implica un tiempo de exposición secuencial. En la presente investigación se calcularon seis tiempos (Tabla 1). No obstante, y para fines de análisis, se contrastan los resultados para el tiempo de exposición de 120 segundos, lapso similar al reportado en las investigaciones recientes. De esa forma se pudieron comparar los datos de la bibliografía con los resultados de esta investigación. Al fijar el tiempo de exposición, las tendencias entre  $\Delta m$  y su velocidad  $v\Delta m$  solamente difieren por esta constante (Figura 6c). Por lo tanto, las tendencias y su coeficiente de determinación son similares ( $R^2 = 0,18$ ). Tomando en cuenta esta particularidad, los resultados de  $v\Delta m$  para *T. plicata* y *A. saccharum* guardan la proporcionalidad observada en los datos de la bibliografía.

Se tuvo como objetivo contrastar los resultados de esta investigación con los datos de la bibliografía, ahora en lo referente a la pérdida de masa resultante por la exposición de la madera a los seis tiempos ensayados. La Figura 7 detalla el comportamiento de *T. plicata* y *A. saccharum*, contrastado con el de la madera sólida y laminada de *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* y *Juniperus pyriformis*; reportados por Sotomayor y Gallegos (2018). Los datos correspondientes a  $\Delta m$  se presentan en la Tabla 3, y los códigos utilizados en la Figura 7 se detallan en la Tabla 4. Estos autores determinaron la pérdida de masa en condiciones de ensayo y con tiempos de exposición similares a los de la presente investigación. A partir de la observación de la Figura 7, se deduce que el comportamiento de la exposición al fuego de las maderas *T. plicata* y *A. saccharum*, es similar al de las especies reportadas por los investigadores referenciados.

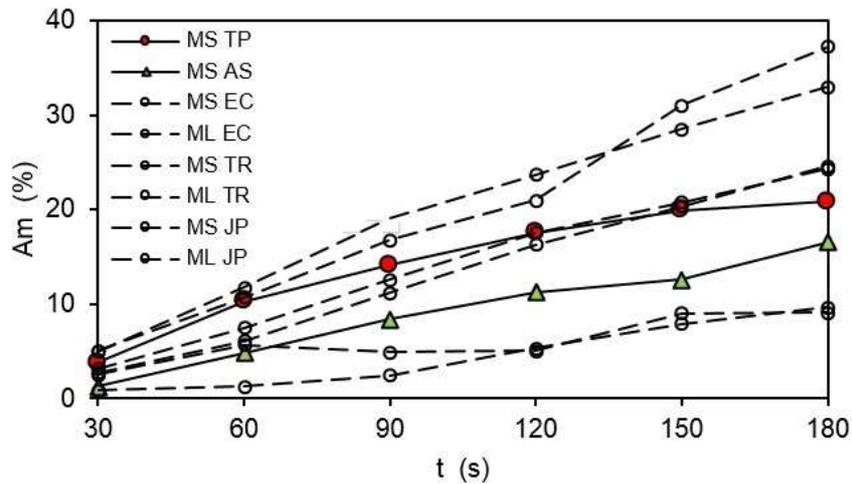


Figura 7. Dispersión y tendencias de la pérdida de masa ( $\Delta m$ ) en función del tiempo de exposición ( $t$ ). Resultados obtenidos por medio de esta investigación y datos consultados en Sotomayor y Gallegos (2018). La leyenda corresponde a los códigos de la Tabla 4.

TABLA 4

Códigos para la Figura 7.

Esta investigación	Código
Madera sólida <i>T. plicata</i>	MS TP
Madera laminada <i>A. saccharum</i>	MS AS
Sotomayor y Gallegos (2018)	
Madera sólida <i>E. cyclocarpum</i>	MS EC
Madera laminada <i>E. cyclocarpum</i>	NL EC
Madera sólida <i>T. rosea</i>	MS TR
Madera laminada <i>T. rosea</i>	ML TR
Madera sólida <i>J. pyriformis</i>	MS JP
Madera laminada <i>J. pyriformis</i>	ML JP

## Conclusiones

Las pruebas de reacción al fuego permitieron determinar el tiempo de ignición de la madera, la pérdida de masa y su velocidad para las especies de madera *T. plicata* y *A. saccharum*.

La mayor densidad de *A. saccharum* produjo que el tiempo de ignición fuera mayor, comparativamente con el de *T. plicata*. Por el contrario la pérdida de masa y su velocidad fueron menores. De manera que, estadísticamente, también los resultados de cada especie se diferenciaron.

Las magnitudes de los parámetros determinados en *T. plicata* y *A. saccharum* son similares a las de maderas mexicanas reportadas en la bibliografía. Asimismo, la reacción al fuego en *T. plicata* y *A. saccharum* siguió también las mismas tendencias para tiempos de exposición análogos a otras investigaciones recientes.

## Agradecimientos

La investigación fue patrocinada por la Coordinación de la Investigación Científica y por la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, ambas dependencias pertenecientes a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. El equipo utilizado para las pruebas de reacción al fuego fue proporcionado por los profesores Luz Elena Alfonsina Ávila Calderón y David Raya González. La madera fue donada al Laboratorio de Mecánica de la Madera por el profesor Salvador Bocanegra Ojeda.

## Referencias

- AENOR internacional. (2010). UNE-EN 13501-1:2007+A1:2010. *Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego*. Madrid: AENOR internacional. 54 p.
- Aseeva, R., Serkov, B., & Sivenkov, A. (2014). *Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings*. Wien: Springer.
- ASTM International. (2108). ASTM E119-18. Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. West Conshohocken: ASTM International. 35 p.

- Babrauskas, V. (2005). Charring rate of wood as a tool for fire investigations. *Fire Safety Journal*, 40(6), 528-554.
- Boonmee, N., & Quintiere, J. G. (2002). Glowing and flaming autoignition of wood. *Proceedings of the Combustion Institute*, 29(1), 289-296.
- Cachim, P. B., & Franssen, J-M. (2010). Assessment of Eurocode 5 Charring Rate. Calculation Methods. *Fire Technology*, 46(1), 169-181.
- Chave, J. et al. (2006). Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species. *Ecological Applications*, 16(6), 2356-2367.
- Čekovská, H., Gaff, M., Osvaldová, L. M., Kačík, F., Kaplan, L., & Kubs, J. (2017). *Tectona grandis* Linn. and its Fire Characteristics Affected by the Thermal Modification of Wood. *Bioresources*, 12(2), 2805-2817.
- 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.
- De Freitas, R., M. A., & Landesmann, A. (2016). Combustion properties of Brazilian natural wood species. *Fire and Materials*, 40(2), 219-228.
- Forest Products Laboratory. (2017). Wood handbook. Wood as an engineering material. Madison: Forest Products Laboratory. 508 p.
- 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.
- Giraldo, M. P., Haurie, L., Sotomayor Castellanos, J. R., Lacasta, A., Montón, J., Palumbo, M., & Navarro, A. (2016). *Characterization of the fire behaviour of tropical wood species for use in the construction industry*. In: World Conference on Timber Engineering. Technischen Universität Wien. Vienna, Austria. pp. 5387-5395.
- Hugi, E., Wuersch, M., Risi, W., & Wakili, K. G. (2007). Correlation between charring rate and oxygen permeability for 12 different wood species. *Journal of Wood Science*, 53(1), 71-75.
- International Organization for Standardization (ISO). (2012). ISO834-1:1999/Amd 1:2012. *Fire Resistance Tests. Elements of Building Construction. Part 1: General Requirements*. Geneva: International Organization for Standardization. 25 p.
- International Organization for Standardization (ISO). (2014a). ISO 13061-1:2014. *Wood. Determination of moisture content for physical and mechanical tests*. Geneva: International Organization for Standardization. 9 p.

- International Organization for Standardization (ISO). (2014b). ISO 13061-2:2014. *Wood. Determination of density for physical and mechanical tests*. Geneva: International Organization for Standardization. 5 p.
- Kuznetsov, V. T., & Fil'kov, A. I. (2011). Ignition of Various Wood Species by Radiant Energy. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 47(1), 65-69.
- Lennon, T., Bullock, M., & Enjily, V. (2000). The Fire Resistance of Medium-Rise Timber Frame Buildings. BRE Report No. 79485-1. Berkshire: BRE.
- Njankouo, J. M., Dotreppe, J. C., & Franssen, J. CM. (2005). Fire resistance of timbers from tropical countries and comparison of experimental charring rates with various models. *Construction and Building Materials*, 19(5), 376-386.
- Niklas, K. J., & Spatz, H-C. (2010). Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. *American Journal of Botany*, 97(10), 1587-1594.
- Osvaldová, L. M., Gaspercova, S., Mitrenga, P., & Osvald, A. (2016). The influence of density of test specimens on the quality assessment of retarding effects of fire retardants. *Wood Research*, 61(1), 35-42.
- Rocha, M. A., & Landesmann, A. (2016). Combustion properties of Brazilian natural wood species. *Fire and Materials*, 40(2), 219-228.
- Sotelo M., C., Weber, J. C., Garcia, R. A. Silva, D.A., & Muniz, G. I. B. (2017). Variation in growth, wood stiffness and density, and correlations between growth and wood stiffness and density in five tree and shrub species in the Sahelian and Sudanian ecozones of Mali. *Trees*, 31(3), 833-849.
- Sotomayor C., J. R. & Gallegos L. 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), 4-46.
- Sotomayor C., J. R., & Carrillo G., M. I. (2017). Comportamiento al fuego de cinco especies mexicanas. Estudio comparativo. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 13(1), 4-38.
- Sotomayor C., J. R., & Giraldo F., M. P. (2017). Resistencia al fuego de madera densificada. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 13(3), 45-62.
- Sotomayor Castellanos, J. R., & Osvaldová, L. M. (2017). Resistencia al fuego de madera laminada. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 13(3), 4-21.
- Sotomayor C., J. R., & Villaseñor A., J. M. (2016). Módulo de rigidez y módulo dinámico de la madera de *Acer saccharum* Marshall y *Thuja plicata* L. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*. 13(33), 20-28.
- Wheeler, E. A. (2011). InsideWood. A web resource for hardwood anatomy. *IAWA Journal*, 32 (2), 199-211.

*Reacción a la exposición al fuego de las maderas Thuja plicata Marshall y Acer saccharum L.*

---

- Xu, Q. F., Chen, L. Z., Harries, K. A., Zhang, F. W., Liu, Q., & Feng, J. H. (2015). Combustion and charring properties of five common constructional wood species from cone calorimeter tests. *Construction and Building Materials*, 96, 416-427.
- Yuksel, M., Baysal, E., & Toker, H. (2014). Combustion characteristics of oriental beech wood impregnated with commonly used borates. *Wood Research*, 59(1), 39-50.