



Componentes químicos de madera deteriorada de vigas del edificio de la Mitra en Morelia, México

Chemical components of deteriorated pine wood of beams of the Mitra building in Morelia, Mexico

Mayra Irery Carrillo Gómez^{1*}, David Raya González¹ y Luz Elena A. Ávila Calderón¹

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera.
Morelia, Michoacán, México.

* Autora de correspondencia. 9506397x@umich.mx

RESUMEN

Se realizó un análisis para determinar los principales componentes químicos de la madera de tres cabezas de vigas de pino procedentes del área de archivo del edificio histórico conocido como La Mitra, de la ciudad de Morelia, en Michoacán, México. Este análisis es complementario a uno previamente realizado, por medio de ultrasonido y con fines de conservación y restauración de estructuras de carácter histórico. Las vigas que aquí se analizaron forman parte del grupo que se estudió en esa primera fase; seleccionadas de forma aleatoria de un grupo de 40 y con dimensiones de 25 cm × 17 cm × 60 cm. Se tomaron muestras de albura y de duramen en dos secciones distintas (zona de empotramiento deteriorada y sana). Para cada viga se determinaron valores de pH, cenizas, análisis de las cenizas, sustancias extraíbles, holocelulosa y lignina. Los resultados encontrados fueron: pH de 3.20 a 4.67, cenizas 0.25% a 1.36%, con mayor concentración de oxígeno (3.36% a 6.64%), calcio (1.80% a 3.46%), carbono (1.18% a 3.45%), potasio (0.20% a 0.84%), aluminio (0.17% a 0.31%), silicio (0.15% a 0.59%) y magnesio (0.15% a 0.56%); solubilidad en sosa de (9.83% a 27.78%), extraíbles totales, en la extracción secuencial, la mayor solubilidad se obtuvo con acetona, (2.92% a 6.96%), seguido de agua caliente (0.25% a 7.49%), metanol (2.03% a 6.22%) y ciclohexano (0.98% a 2.66%); holocelulosa (68.22% a 84.01%) y lignina (24.19% a 31.83%). El pH, la solubilidad en sosa, la holocelulosa y la lignina presentaron una variación estadística significativa ($P < 0.05$) entre albura y duramen de las zonas sanas y deterioradas.

PALABRAS CLAVE: conservación, extraíbles, holocelulosa, lignina, *Pinus* spp., sustancias inorgánicas.

ABSTRACT

An analysis was carried out to determine the main chemical components of the wood of three pieces of pine beams from the archive area of the historic building known as La Mitra, in the city of Morelia, in Michoacán, Mexico. This analysis is complementary to one previously carried out, by means of ultrasound and for the purpose of conservation and restoration of historical structures. The beams that were analyzed here are part of the group that was studied in that first phase, randomly selected from a group of 40 and with dimensions of 25 cm × 17 cm × 60 cm. Sapwood and heartwood samples were taken in two different sections (decayed and healthy embedment area). For each beam, pH, ashes, ash analysis, extractable substances, holocellulose and lignin values were determined. The results found were: pH from 3.20 to 4.67, ashes 0.25% to 1.36%, with a higher concentration of oxygen (3.36% to 6.64%), calcium (1.80% to 3.46%), carbon (1.18% to 3.45%), potassium (0.20% to 0.84%), aluminum (0.17% to 0.31%), silicon (0.15% to 0.59%), and magnesium (0.15% to 0.56%); solubility in soda (9.83% to 27.78%), total extractables, in the sequential extraction, the highest solubility was obtained with acetone, (2.92% to 6.96%), followed by hot water (0.25% to 7.49%), methanol (2.03% to 6.22%) and cyclohexane (0.98% to 2.66%); holocellulose (68.22% to 84.01%) and lignin (24.19% to 31.83%). The pH, solubility in soda, holocellulose and lignin presented a statistically significant variation ($P < 0.05$) between sapwood and heartwood in healthy and deteriorated areas.

KEYWORDS: conservation, extractives, holocellulose, lignin, *Pinus* spp., inorganic substances.

INTRODUCCIÓN

El envejecimiento de la madera se conoce como la modificación inevitable (deterioro) de las propiedades químicas, físicas y mecánicas de un material debido a las influencias ambientales, en el curso de un almacenamiento o uso extensivo. Los agentes de degradación más comunes son los organismos que destruyen la madera, la intemperie o la carga a largo plazo de todos los elementos estructurales sujetos a diferentes fuerzas que actúan sobre ellos, es decir, el peso que soportan las vigas de madera a través de los años. Durante el proceso de descomposición de la madera se presenta una cantidad importante de pérdida de masa, rigidez y resistencia. Es necesario monitorear el proceso de descomposición de la madera para garantizar el cumplimiento de sus requisitos estructurales y de seguridad. En el presente estudio se investiga la influencia de los agentes de degradación asociados al envejecimiento natural de una madera mediante la determinación de sus principales componentes químicos.

México es uno de los 162 países que cuentan con lugares denominados como Patrimonio Mundial; es el tercer país con el mayor número de ciudades inscritas en la Lista de Patrimonio (tiene actualmente 10 ciudades, tan solo 6 menos que Italia y 5 menos que España). El estado de Michoacán cuenta con una ciudad denominada Patrimonio de la Humanidad. Las denominaciones son otorgadas previo estudio que califica diferentes puntos, entre los cuales se encuentra su patrimonio arquitectónico; esto les permite acceder a programas que fomentan el desarrollo y la conservación de estos lugares (Consejo Internacional de Monumentos y Sitios [Icomos], 2017).

Debido a la importancia que tiene para la ciudad de Morelia la conservación de su centro histórico, este trabajo resulta útil para varios sectores de la sociedad relacionados con ese tema. Se trata de apoyar al entendimiento y la aplicación de herramientas que contribuyan a la restauración y conservación de los elementos de madera.

De acuerdo con Madrigal Sánchez y Guridi-Gómez (2002), se conocen 20 especies del género *Pinus* en el estado de Michoacán, México; de ellas, 11 se encuentran

en el municipio de Morelia. Algunos estudios referentes a este género han abarcado temas como características anatómicas (AmbrizParra et al., 2002; Ochoa Álvarez, 2003; De la Paz-Pérez Olvera y Dávalos-Sotelo, 2016), propiedades físicomecánicas (Herrera y Bocanegra, 1996; Ortega-Escalona, 2001; Rojas y Villers, 2005; Silva-Arredondo y Návar-Cháidez, 2012) y otras propiedades tecnológicas (Cruz de León y Ambriz-Parra, 2004; Aquino-González et al., 2010).

La variación del contenido de humedad de la madera debido a procesos de adsorción o desorción conduce a cambios dimensionales y puede resultar en daños irreversibles como deformación, agrietamiento o delaminación. Para evitar estos resultados, es deseable proporcionar a las piezas de madera condiciones climáticas estables; sin embargo, no siempre es posible, debido a razones técnicas o financieras. La acción European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research [COST], IE0601, “Ciencia de la madera para la conservación del patrimonio cultural”, aborda este tipo de problemas, teniendo como propósito principal proporcionar información respecto al acondicionamiento climático suficiente para este tipo de maderas y la determinación del alcance de las fluctuaciones climáticas aceptables durante su almacenamiento (Kránitz et al., 2016).

Sin embargo, el proceso de envejecimiento de la madera y las propiedades de la madera envejecida apenas han sido investigados hasta ahora. Además, los resultados de los estudios suelen ser contradictorios y, en general, difíciles para compararlos entre sí, puesto que tanto la especie de madera como la edad de los especímenes varían y a menudo los métodos utilizados también son diferentes.

Los cambios en las propiedades físicas y mecánicas de la madera a causa del envejecimiento se originan por cambios en la microestructura y por cambios químicos en los componentes. Desde su almacenamiento, las diferentes condiciones determinan qué tipo de procesos químicos pueden ocurrir con un efecto consecuente en el proceso de envejecimiento. Por tanto, se deben identificar las condiciones aeróbicas y anaeróbicas en las que se encuentran (Fengel, 1991).



El comportamiento de la madera y los antecedentes de carga del material deben tenerse en cuenta al investigar el efecto del envejecimiento sobre las propiedades mecánicas. La literatura sobre este comportamiento en la madera es bastante voluminosa (Bodig y Jayne, 1993; Smith et al., 2003).

Si la carga mecánica se combina con cambios en la humedad relativa del aire y con el contenido de humedad de la madera, se produce un efecto llamado mecánico-absorbente. La carga junto con la desorción da como resultado una deformación mayor que la suma de las deformaciones debido a la contracción pura y a la carga pura. A pesar de los numerosos estudios realizados en este tema, el fenómeno aún no ha sido completamente aclarado, debido al alto número de factores (condiciones climáticas, magnitud y duración de la carga, entre otros); (Hunt, 1986; Entwistle y Zadoroshnyj, 2008).

Cavalli et al. (2016) mencionan que la variación de las propiedades mecánicas de la madera debido al envejecimiento es una consecuencia del cambio en su microestructura. Estos autores observaron una disminución en la cantidad de materiales celulósicos y atribuyeron la mayor rigidez de la madera envejecida a la cristalinidad de la celulosa, al observar un incremento en la cristalinidad durante los primeros 100 años, seguido de una disminución progresiva.

Los principales componentes químicos que constituyen las paredes de las células de la madera son celulosa, lignina y hemicelulosas. La celulosa es una macromolécula de carbohidratos que representa de 40% a 45% del peso de la madera, siendo ligeramente superior en maderas de angiospermas que en maderas de gimnospermas (Kránitz et al., 2016).

La composición química de la madera de los pinos mexicanos se ha estudiado para pocas especies. En 2001, Rutiaga Quiñones estimó en madera de albura y duramen de *P. pseudostrobus* la solubilidad en éter de petróleo (0.7% y 4.4%), en acetona (0.7% y 2.8%), en metanol (0.8% y 0.8%), en agua fría (1.0% y 3.7%) y en agua caliente (1.2% y 1.5%); además determinó la lignina Runkel (26.6% y 27.6%) y las cenizas (0.16% y 0.08%), identificando los elementos presentes en estas últimas.

Es conocido que los extraíbles del duramen y de la corteza pueden presentar alta resistencia al biodeterioro; a este respecto se ha encontrado que el extracto metanólico de corteza de Brasil (*Haematoxylon brasiletto*) es inhibidor de bacterias y levaduras; en él se ha identificado hematoxilina, brasilina y ácido gálico como los mayores inhibidores de estos agentes biológicos (Rivero-Cruz, 2008).

Ávila Calderón (2011) estudió los componentes químicos de la madera de *P. pringlei* provenientes de árboles sanos e infectados por muérdago *Psittacanthus macrantherus*. Encontró que los contenidos de sustancias inorgánicas (0.34%), de extraíbles solubles en etanol ciclohexano (0.83%), de extraíbles solubles en agua fría (3.62%) y de holocelulosa (63.58%) resultaron ser mayores en madera sana que en madera plagada (0.31%, 0.67%, 3.09% y 42.82%, respectivamente); por el contrario, la madera infectada presentó valores más altos de solubilidad en sosa (9.87%), de extraíbles solubles en agua caliente (6.22%) y de lignina (28.50%) en relación con la madera sana (8.46%, 5.29% y 23.56%, respectivamente).

Revilla González (2011) estudió algunos aspectos de la química de la madera de *P. cembroides*, *P. johannis*, *P. maximartinezii* y *P. pinceana* cuantificando pH (4.09 a 5.63) y cenizas (< 0.6% de las que 90% fueron potasio, calcio y magnesio), encontró además contenidos de extraíbles altos especialmente en el duramen; bajo contenido de celulosa (35.5% a 37.9% determinado por hidrólisis de carbohidratos y 34.8% a 37.1% determinado por desligificación), alto contenido de lignina (28.8% a 31.5% y 32.6% a 36.4%) y alto contenido de hemicelulosas (29.4% a 32.2% y 28.8% a 30.3%); determinó también las hemicelulosas presentes (glucomanana 15.6% a 20.6% y glucuronoxilana 7.2% a 10.2%).

Ghavidel et al. (2020) consideraron que los ejemplares de abeto de su investigación tenían solo 120 años, por lo que solo se pueden ver pequeñas diferencias con su contraparte de muestra reciente de abeto. También es posible que los procesos de degradación sean bastante lentos en los primeros 120 años y los cambios son demasiado pequeños para ser detectados por los métodos químicos húmedos utilizado en la actualidad (Kránitz et al.,

2016). Las tendencias observadas relacionadas con los compuestos químicos concuerdan bien con la literatura y los resultados de cristalinidad corresponden a la teoría de Kohara y Okamoto (1955).

Dada la poca información que se tiene de los componentes químicos de las maderas mexicanas de pino en condiciones sanas, es aún menor la información en las maderas deterioradas procedentes de edificaciones de tipo colonial, y por eso son necesarios estudios que permitan establecer interrelaciones con propiedades físicas, mecánicas y tecnológicas de este valioso recurso.

La investigación propone como hipótesis de trabajo que las características químicas de las vigas pueden variar en albura y duramen debido a su degradación por factores biológicos (zonas sanas y deterioradas) y a sus condiciones de uso.

OBJETIVOS

Determinar los componentes químicos básicos de tres cabezas de vigas de madera de pino provenientes del área de archivo del edificio de la Mitra de la ciudad de Morelia, tanto en la zona de albura como de duramen, a través de los análisis de contenido de humedad, pH, contenido de cenizas, extraíbles totales, extraíbles solubles en solventes orgánicos y en agua caliente, contenido de lignina y contenido de holocelulosa, con el propósito de conocer las características químicas de madera sana y deteriorada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Colecta y habilitación del material

Para determinar los principales componentes químicos de la madera de tres cabezas de vigas de pino procedentes de los trabajos de conservación del área de archivo de la Mitra, el material fue analizado previamente de un conjunto de vigas sustituidas (Carrillo et al., 2019; Carrillo y Carreón, 2020; Carrillo y Carreón, 2021). La estrategia experimental de esa investigación consistió en analizar viga por viga una muestra representativa del entramado del techo (Rodríguez-Liñán y Rubio, 1995; Bertoloni Cestari et al., 2010; Branco et al., 2017). En el presente estudio de caso, el factor de variabilidad se limita al género *Pinus* y la estrategia experimental consistió en analizar las zonas empotradas de las vigas del entramado del techo, haciendo una distinción entre la madera de albura y duramen y entre la madera proveniente de distintas ubicaciones a lo largo de la pieza: en el extremo de inicio de la viga y a una distancia de 60 cm del primer punto de muestreo, esto último con el fin de estudiar madera sana y madera deteriorada.

Las porciones estudiadas de las vigas tienen una sección transversal de 25 cm × 17 cm, y fueron divididas en tres piezas de 20 cm de longitud cada una, con base en su grado de deterioro, para obtener la zona 1 (deteriorada), la zona 2 (intermedia) y la zona 3 (sana) como lo indica la figura 1.

Las muestras se analizaron y se clasificaron por áreas de albura y duramen en sus zonas sanas y deterioradas y se consideró la nomenclatura siguiente: albura sana (As), albura deteriorada (Ad), duramen sano (Ds) y duramen deteriorado (Dd).

Del material se obtuvieron tablillas de 1 cm × 6 cm × 10 cm, que fueron astilladas, secadas al aire y molidas en un equipo Wiley. La harina obtenida se clasificó con tamices para el análisis químico y se empleó la fracción que pasó por la malla 40 (425 µm) y que fue retenida en la malla 60 (250 µm). Las determinaciones se realizaron por duplicado.

Análisis químico

pH

La determinación del pH (Moisture pH; MpH) se basó en el método de Sandermann y Rothkamm (1959); 2 g de harina de madera sin extraer se colocaron en un vaso de precipitados con 20 ml de agua destilada; se registró el pH inicial, determinado con un potenciómetro marca HANNA y se volvió a registrar 5 min, 4 h, 24 h y 48 h después de la primera medición.



Puntos de extracción del material para pruebas químicas.

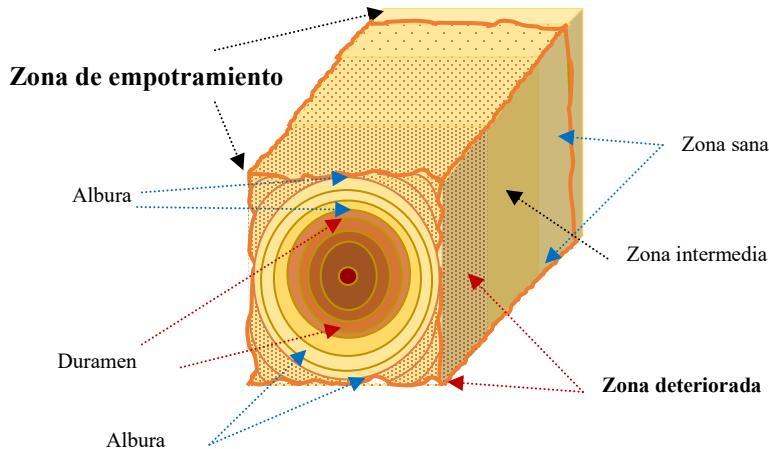


FIGURA 1. Diagrama de las zonas de extracción del material para pruebas químicas.

Cenizas (sustancias inorgánicas)

El contenido de estas sustancias se calculó gravimétricamente después de quemar cuidadosamente 2 g de harina de madera sin extraer en un crisol de níquel, previamente tarado, sobre una placa de calentamiento hasta el cese de desprendimiento de humo, para su posterior calcinación en una mufla a 525 °C; el proceso se dio por concluido cuando el crisol con el material de estudio tuvieron peso constante; el procedimiento y cálculo de las sustancias inorgánicas o cenizas se realizó de acuerdo con la norma T 211 om-93 (Technical Association for the Pulp and Paper Industries [TAPPI], 2000a).

Para la identificación de los elementos presentes en las sustancias inorgánicas se realizó un microanálisis en un espectrómetro de Rayos X, acoplado a un microscopio electrónico de barrido marca Jeol modelo JSM- 6400. Las condiciones de operación para los análisis fueron 20 kV y 8.5 segundos, obteniéndose los espectros respectivos en puntos aleatorios.

Solubilidad en sosa

En un matraz, se colocaron 2 g de harina de madera y 100 ml de NaOH a 1.0%; se llevaron a digestión en baño de

agua durante 60 minutos. Se agitó la harina con una varilla de vidrio durante aproximadamente 5 s a los 10 min, 15 min y 25 min después de la colocación en el baño. Al final de la digestión, el material se filtró y se lavó con 100 ml de agua caliente, posteriormente se neutralizó en dos etapas con 25 ml de ácido acético a 10% y se lavó nuevamente con agua caliente hasta dejar el material libre de ácido. Finalmente, el filtro y su contenido se secaron a 105 °C hasta obtener peso constante. El proceso y el cálculo de la solubilidad en sosa se efectuaron siguiendo la norma T 212 om-98 (TAPPI, 2000b).

Sustancias extraíbles

Para determinar la cantidad total de sustancias extraíbles (T), a 6 g de harina de madera se aplicó una extracción sucesiva sólido-líquido en equipo Soxhlet con 200 ml de los solventes siguientes: ciclohexano (CH), acetona (ACE) y metanol (MET); finalmente, agua caliente bajo reflujo (AC). Los períodos de extracción fueron de cuatro horas. Los solventes se recuperaron en un rotavapor aplicando vacío y el extracto respectivo se colocó en un desecador, con gel de sílice como agente desecante, hasta peso constante. El contenido de extraíbles para cada solvente se calculó

dividiendo el peso del extracto bajo estas condiciones entre el peso de la harina anhidra (resultante de los 6 g sometidos a secado a 103 °C), referido porcentualmente. Los extraíbles totales se calcularon sumando los porcentajes de los extraíbles obtenidos con cada solvente. La harina de madera, después de la extracción sucesiva, se designó como harina libre de extraíbles y se empleó para determinar lignina y holocelulosa.

Holocelulosa

Se cuantificó el contenido de holocelulosa empleando clorito de sodio de acuerdo con el procedimiento de Wise et al. (1946). En un vaso de precipitados se vertieron 32 ml de agua destilada a 1 g de harina de madera libre de extraíbles; se adicionaron 0.3 g de clorito de sodio y 2 gotas de ácido acético glacial y la muestra se llevó a un baño de agua a 75 °C. La adición de clorito de sodio y ácido acético glacial, en las cantidades indicadas anteriormente, se repitió cíclicamente cada hora, por un periodo total de 4 horas. Despues de la cloración, la solución fue filtrada, lavada con 100 ml de agua fría, seguida de 10 ml de acetona; el residuo fue llevado a un horno convencional a 40 °C hasta peso constante y después se reservó en un desecador. El contenido de holocelulosa se calculó dividiendo el peso del residuo obtenido a 40 °C temperatura entre el peso resultante de la medición de la harina libre de extraíbles sometida al proceso de secado en estufa a 103 °C referido porcentualmente (siendo menor a 1 g debido a la perdida de sustancias extraíbles).

Lignina

El contenido de lignina en la harina de madera libre de extraíbles se determinó de conformidad con el método TAPPI T 222 om-98 (TAPPI, 2000c), para obtener lignina “Klason”. A la harina libre de extraíbles, se le agregó ácido sulfúrico a 72%, se agitó, posteriormente se dejó reposar por dos horas, pasado ese tiempo, se adicionaron 300 ml de agua destilada y se hizo ebullir por 4 horas, a continuación, la muestra se filtró y lavó con agua destilada hirviente hasta obtener un pH neutro, finalmente, el residuo se llevó a la

estufa para conseguir el peso anhidro. El contenido de lignina se calculó dividiendo el peso de esta muestra anhidra entre el peso de la harina libre de extraíbles anhidra referido porcentualmente.

Análisis estadísticos

Los valores de los componentes químicos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza y a la prueba de Tukey para comparar parejas de medias de los tratamientos (albura y duramen sano y deteriorado en cada viga). El valor de probabilidad alfa establecido para calificar como significativas a las diferencias encontradas en las fuentes de variación fue de 0.05. Los resultados obtenidos se procesaron mediante el software Statistica (StatSoft Inc., 2005).

RESULTADOS

Los resultados promedio y la desviación estándar de los componentes químicos para cada una de las cabezas de las vigas de pino estudiadas se muestran en la tabla 1. Las sustancias inorgánicas determinadas por espectroscopía de rayos X se muestran en la tabla 2.

DISCUSIÓN

pH

Los valores de pH obtenidos en este estudio son moderadamente ácidos, encontrándose diferencia significativa ($P < 0.05$) entre las tres vigas y sus zonas de albura y duramen (sano y deteriorado). Los valores más altos de pH se observaron para el caso de (As) en la viga 1 y los valores más bajos se presentaron en la viga 2 (Dd) (Tabla 1). Los valores de pH son muy cercanos a lo registrado para cinco especies de pino mexicanos (4.0 a 4.4) por Bernabé-Santiago et al. (2013) y en albura de seis pinos mexicanos (4.26 a 5.23), de acuerdo con Rutiaga Quiñones (2001) y Revilla González (2011); además, son valores más ácidos que los determinados en pinos europeos (pH de 4.9 a 6.0) por Fengel y Wegener (1989).



TABLA 1. Componentes químicos de tres cabezas de vigas de pino.

Determinación	V1				V2				V3				P
	As	Ad	Ds	Dd	As	Ad	Ds	Dd	As	Ad	Ds	Dd	
pH	4.67 (+ 0.17)	3.78 (+ 0.17)	4.14 (+ 0.02)	3.99 (+ 0.02)	3.58 (+ 0.17)	3.58 (+ 0.17)	4.05 (+ 0.02)	3.2 (+ 0.02)	3.88 (+ 0.17)	3.9 (+ 0.17)	3.75 (+ 0.02)	3.61 (+ 0.02)	*
	a b c d	a	a b c d	b c d	a c	a b c	a b c	a b d	a d	c d	b d	a c	
Sustancias inorgánicas 1	0.48 (+ 0.04)	0.43 (+ 0.03)	1.08 (+ 0.19)	1.36 (+ 0.14)	0.4 (+ 0.04)	0.5 (+ 0.43)	0.52 (+ 0.19)	0.51 (+ 0.14)	0.45 (+ 0.04)	0.86 (+ 0.43)	0.25 (+ 0.19)	0.65 (+ 0.14)	*
								d			d		
Solubilidad a la Sosa 1	9.83 (+ 0.52)	22.59 (+ 0.04)	17.18 (+ 0.03)	27.78 (+ 0.16)	18.02 (+ 0.52)	22.59 (+ 0.04)	24.87 (+ 0.03)	27.78 (+ 0.16)	17.04 (+ 0.52)	12.8 (+ 0.04)	17.5 (+ 0.03)	15.43 (+ 0.16)	*
	b c d	a b c d	a b d	a b c d	b c d	a b c	a b c d	a b c	b	a b c d	a b d	a b c d	
Extraíbles totales 1	13.42 (+ 0.25)	16.43 (+ 0.25)	17.51 (+ 0.3)	15.25 (+ 0.3)	8.2 (+ 0.25)	14.28 (+ 0.25)	21.85 (+ 0.3)	16.81 (+ 0.3)	10.36 (+ 0.25)	12.75 (+ 0.25)	14.48 (+ 0.3)	15.48 (+ 0.3)	*
	a b c d	a b c d	a b c d	a b c d	a c d	a b c	a b c d	a b c d	a b c d	c d	a b c d	b c	
Ciclohexano 1	0.98 (+ 0.07)	1.2 (+ 0.07)	1.35 (+ 0.05)	1.99 (+ 0.05)	1.4 (+ 0.07)	1.34 (+ 0.07)	2.57 (+ 0.05)	2.66 (+ 0.05)	1.47 (+ 0.07)	1.42 (+ 0.07)	1.76 (+ 0.05)	1.54 (+ 0.05)	*
	a b c d	a b c d	a b c d	b c	a c d	a b c	a b c d	a b c d	a b c d	c d	a c d	c d	
Acetona 1	2.92 (+ 0.32)	3.78 (+ 0.32)	5.01 (+ 0.23)	3.45 (+ 0.23)	3.2 (+ 0.32)	3.65 (+ 0.32)	6.96 (+ 0.23)	7.93 (+ 0.23)	3.52 (+ 0.32)	4.07 (+ 0.32)	3.43 (+ 0.23)	3.49 (+ 0.23)	*
	b c d	b c d	b c	a b c d	b d		b c d	a b c d	a	a b c d	b	b d	
Metanol 1	3.68 (+ 0.4)	3.96 (+ 0.4)	4.15 (+ 0.33)	4.38 (+ 0.33)	3.35 (+ 0.4)	4.25 (+ 0.4)	6.22 (+ 0.33)	5.55 (+ 0.33)	2.03 (+ 0.4)	3.12 (+ 0.4)	3.37 (+ 0.33)	3.19 (+ 0.33)	*
	a c	c	a c	a b c d		a	a b c d	a c d	a	a b	b	c d	
Agua caliente 1	6.14 (+ 0.24)	7.49 (+ 0.24)	7.00 (+ 0.4)	5.43 (+ 0.4)	0.25 (+ 0.24)	5.04 (+ 0.24)	6.10 (+ 0.4)	0.67 (+ 0.4)	3.34 (+ 0.24)	4.14 (+ 0.24)	5.92 (+ 0.4)	7.26 (+ 0.4)	*
	a b c	a b d	a b c	a b c d	a b c d	a b c d	a b c	b c	a b c d	a b	a b d	b c	
Holeocelulosa 2	82.08 (+ 0.5)	76.17 (+ 0.5)	69.75 (+ 0.35)	79.42 (+ 0.35)	75.49 (+ 0.5)	69.27 (+ 0.5)	68.22 (+ 0.35)	84.01 (+ 0.35)	78.58 (+ 0.5)	83.25 (+ 0.5)	83.25 (+ 0.35)	80.94 (+ 0.35)	*
	a b c d	a b c d	a b c d	a b c d	a b c d	a b c d	d	a b c d	a b c d	a b c d	a b c d	a b c d	
Lignina 2	24.37 (+ 1.4)	29.02 (+ 1.4)	27.89 (+ 0.6)	31.83 (+ 0.6)	24.19 (+ 1.4)	27.65 (+ 1.4)	28.54 (+ 0.6)	30.58 (+ 0.6)	31.61 (+ 1.4)	26.13 (+ 1.4)	29.40 (+ 0.6)	30.39 (+ 0.6)	*
	c d	a b	a d	b c d	a b d	a	d	a b c d	a b c d	a b c d	a	c d	

Se muestra la media (desviación estándar). P = probabilidades en ANOVA con un factor (zona de muestreo).

1: Componentes en porcentajes basados en el peso anhidro. 2: Componentes en porcentaje basados en el peso anhidro libre de extraíbles.

*: P < 0.05, ns: P > 0.05. Letras distintas en una misma fila indican diferencias significativas (Tukey, P < 0.05).

Las letras minúsculas representan la comparación entre las zonas de As, Ad, Ds y Dd en cada una de las tres vigas (columnas), los valores con la misma letra indican que no existe diferencia significativa (P > 0.05).

Tabla 2. Sustancias inorgánicas (en porcentaje) en albura y duramen de las vigas 1, 2 y 3.

Elemento	Viga 1 (%)				Viga 2 (%)				Viga 3 (%)			
	V1 As	V1 Ad	V1 Ds	V1 Dd	V2 As	V2 Ad	V2 Ds	V2 Dd	V3 As	V3 Ad	V3 Ds	V3 Dd
Carbono	1.18	1.72	3.24	2.39	1.36	1.69	0.41	3.45	3.40	1.69	1.48	2.26
Oxígeno	4.72	5.49	6.47	5.76	4.90	5.10	3.36	6.64	4.74	5.10	3.58	4.02
Magnesio	0.48	0.51	0.47	0.49	0.30	0.56	0.37	0.46	0.15	0.56	0.17	0.15
Aluminio	nd	nd	0.31	nd	0.17	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Silicio	nd	nd	0.59	nd	nd	0.15	0.31	0.18	nd	nd	nd	nd
Potasio	0.42	0.38	0.54	0.40	0.49	0.48	0.20	0.55	0.40	0.48	0.84	0.59
Calcio	3.19	3.03	2.53	3.04	2.68	3.46	3.05	2.41	2.35	3.46	1.80	2.03

Nd = no detectado; As = albura sana; Ad = albura dañada; Ds = duramen sano; Dd = duramen dañado.

Esta variación se debe a que el grado de acidez de la madera se ve afectado por la localización en el árbol de la muestra analizada, la estación, los factores climáticos, la cantidad y el tipo de extraíbles, y por la presencia de grupos ácidos y ácidos libres (Bernabé-Santiago et al., 2013).

El pH moderadamente ácido en las maderas en estudio puede afectar su utilización; al estar en contacto con metales puede causar corrosión; también se puede ver afectada la fijación de sustancias preservantes, el fraguado de los adhesivos, la fabricación de tableros y productos plástificados y el proceso de pulpeo (Fengel y Wegener, 1989; Poblete et al., 1991; Poblete y Roffael, 2004; Sandermann y Rothkamm, 1959).

Cenizas

El contenido de sustancias inorgánicas en las muestras se encuentra entre 0.25% y 1.36% y no se encontró diferencia significativa en esta determinación. Los resultados se encuentran dentro del intervalo indicado por Revilla González (2011) para cinco especies de pinos mexicanos (0.39% a 0.52%) y por Bernabé-Santiago et al. (2013); 0.30%. También, los resultados se aproximan a los obtenidos para *P. sylvestris* (0.27%; Balaban y Yilgör, 1995)

y para *P. pringlei* (0.34%; Ávila Calderón, 2011), pero son mayores a los encontrados en duramen (0.08%) y en albura (0.16%) en *P. pseudostrobus* (Rutiaga Quiñones, 2001) y al intervalo porcentual (0.1% a 0.8%) registrado para algunas especies de pino extranjeras (Fengel y Wegener, 1989; González Pimentel, 2005; Rodríguez, 2005; Fonseca, 2006). Para algunas maderas europeas de pino de edad reciente se presentan valores de 0.26% a 0.30%, en tanto que para maderas europeas de alrededor de 120 años de 0.27% a 0.40% (Kránitz et al., 2016; Ghavidel et al., 2020).

El resultado del microanálisis de las cenizas, mediante rayos X, indica que los elementos encontrados en mayor proporción son oxígeno, calcio, carbono, potasio, aluminio, silicio y magnesio (Tabla 2); estos elementos son los principales componentes de las sustancias inorgánicas en la madera (Fengel y Wegener, 1989); también, registrados en otros pinos mexicanos, en ese orden de importancia (Rutiaga Quiñones, 2001; Revilla González, 2011), mientras que en algunos estudios es mayor la proporción de magnesio que potasio en *P. pringlei* (Ávila, 2011).

En este estudio, el silicio solo se encontró en la muestra Ds de la viga 1 y en tres muestras (As, Ds, y Dd) de la viga 2 (Tabla 2). Algunos autores consideran que una



concentración de silicio entre 1.0% y 3.0% representa problemas para la transformación de la madera, principalmente, en el desafilado de las herramientas de corte (Honorato Salazar y Hernández Pérez, 1998) y, específicamente, en la rapidez de desafilado en la sierra banda (Kirlov, 1980). No obstante, la cantidad de este elemento químico detectada en las maderas en estudio puede considerarse de bajo impacto en el desafilado de herramientas de corte al procesar este material.

Solubilidad en sosa

Los resultados obtenidos muestran que la muestra As de la viga 1 presenta el menor porcentaje de solubilidad en sosa. Los resultados indicaron que existe una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$) con respecto a las otras muestras: se observó que hay una mayor solubilidad en las muestras de madera deteriorada Ad y Dd en las vigas 1 y 2 que en las de madera sana As y Ds en la viga 2 siendo estas últimas las que presentaron los valores más altos. Los valores en duramen siempre fueron mayores que en la albura independientemente de la viga a la que perteneciera la muestra (Tabla 1). Los valores obtenidos para todas las vigas en estudio están en entre 9.83% y 27.78% y se asemejan a los mencionados en la literatura para diferentes especies de pino (11% a 16%; Rowell, 2005; Ávila Calderón y Rutiaga Quiñones, 2014) y en el intervalo de 17.9% a 25.4% observado por Bernabé-Santiago et al., (2013).

Los extraíbles solubles en sosa pueden ser carbohidratos de bajo peso molecular, principalmente hemicelulosas, estos están relacionados con el grado de pudrición por hongos o el deterioro por calor, luz u oxidación (TAPPI, 2000b; Bernabé-Santiago et al., 2013).

Sustancias extraíbles

De acuerdo con los resultados obtenidos (Tabla 1), se presentó diferencia significativa entre los extraíbles para los diferentes solventes (8.2% a 21.85%) (ciclohexano, acetona, metanol, agua caliente), entre madera sana y deteriorada, y entre albura y duramen de las tres vigas. La mayor solubilidad de la madera se logró con acetona, seguida de

agua caliente y metanol; los menores valores se obtuvieron con ciclohexano.

Los rendimientos alcanzados son mayores a los observados por otros autores para especies de pino (2.4% a 7.7%; Fengel y Wegener, 1989; Rodríguez, 2005; Fonseca, 2006) y similares a los calculados para *P. oocarpa* (10.89%; González Pimentel, 2005), en duramen de *P. pseudostrobus* (13.2%; Rutiaga Quiñones, 2001) y en albura y duramen de *P. cembroides*, *P. maximartinezii*, *P. johannis* y *P. pinceana* (11.5% a 33.7%; Revilla González, 2011). Para algunas maderas europeas de edad reciente se presentan valores de 1.38% a 11.96%, en tanto que para maderas europeas de alrededor de 120 años va de 1.34% a 2.95% (Kránitz et al., 2016; Ghavidel et al., 2020).

La relación entre el contenido de extraíbles y las propiedades físicas y tecnológicas dependen del contenido de extraíbles, de su tipo y de su localización; por un lado, en algunas especies pueden aumentar la estabilidad dimensional y la resistencia mecánica; por el otro, pueden disminuir el punto de saturación de la fibra y el contenido de humedad en equilibrio y afectar otras propiedades tecnológicas (Poblete et al., 1991; Ávila Calderón y Herrera Ferreyra, 2012).

Holocelulosa

Se encontró diferencia significativa ($P < 0.05$) en el contenido de holocelulosa en las tres vigas y en las zonas sana y deteriorada (Tabla 1). Los valores determinados se encuentran muy cercanos lo encontrado en la literatura para maderas de coníferas (64.0% a 82.5%; Fengel y Wegener, 1989; Rowell, 2005). En algunos casos se han publicado resultados para pinos mexicanos con valores de entre 68.1% y 74.7% (Bernabé-Santiago et al., 2013) y de 63.6% a 68.7% (Rutiaga Quiñones, 2001; Ávila Calderón, 2011; Revilla González, 2011). Para algunas maderas europeas de edad reciente se presentan 35.34% a 53.016% para celulosa y 20.98% a 32.31% para hemicelulosa; en tanto que, para maderas europeas de alrededor de 120 años, 49.03% a 56.43% para celulosa y 19.32% a 29.44% para hemicelulosa (Kránitz et al., 2016; Ghavidel et al., 2020).

Lignina

El valor más alto de lignina Runkel fue observado en la viga 1 en la zona Dd y el valor menor en la viga 2 en la zona As, con diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$) respecto a las muestras de albura y duramen (Tabla 1). Los valores de lignina aquí obtenidos concuerdan con los observados en madera de pinos michoacanos como *P. leiophylla* (28.5 %; Bernabé-Santiago et al., 2013), en duramen y albura de *P. pseudostrobus* (27.6% y 26.6%, respectivamente; Rutiaga Quiñones, 2001) y en madera de otras especies de pinos mexicanos (23.6% a 31.2%; Ávila Calderón, 2011; Revilla González, 2011); igualmente, son similares a otros obtenidos para maderas de pino de origen extranjero (22.0% a 35.0%; González Pimentel, 2005; Rodríguez, 2005; Rowell, 2005; Fonseca, 2006). Para algunas maderas europeas de edad reciente se presentan valores de 28.14% a 31.62%; y para esas mismas especies europeas de alrededor de 120 años de 29.90% a 31.27% (Kránitz et al., 2016; Ghavidel et al., 2020).

Se conoce que el contenido de lignina desempeña un papel importante en el comportamiento de la madera ante los cambios dimensionales por variaciones en el contenido de humedad (Bárcenas-Pazos y Dávalos-Sotelo, 1999); así, la baja contracción máxima (radial 1.6%, tangencial 2.0%) encontrada por Herrera Ferreyra y Bocanegra Ojeda (1996) para la madera de *P. leiophylla*, en comparación con la relativamente alta publicada por ellos mismos para las maderas de *P. montezumae* (radial 5.0%, tangencial 6.6%) y *P. oocarpa* (radial 3.3%, tangencial 4.4%) y por Sotomayor-Castellanos et al. (2010) para *P. michoacana* (radial 3.1%, tangencial 6.9%) pudiera explicarse por su alto contenido de lignina.

El resultado de los cambios estructurales a nivel molecular, cuando la madera se somete a carga, es una reorientación de sus moléculas. A niveles de esfuerzos más altos, se produce deslizamiento y posteriormente se destruyen los enlaces químicos, lo que resulta en daños estructurales irreversibles y se reduce la resistencia mecánica. Los factores importantes que influyen en el comportamiento de la fluencia son el nivel, la duración y el tipo de carga. Cuando no hay suficiente tiempo para total recupe-

ración, la deformación por fluencia se acumulará a lo largo de los ciclos, lo que provocará nuevamente un daño irreversible en el material. Existen estudios que contemplan análisis más complejos con los cuales es posible pronosticar la edad de este material con base en la degradación de sus elementos constituyentes (Ghavidel et al., 2020).

Esta investigación forma parte de diversos estudios en los cuales se efectuaron ensayos no destructivos y ensayos físico-mecánicos, en campo y laboratorio permitiendo la realización de diagnósticos en estructuras de la madera de edificaciones pertenecientes al Patrimonio Histórico construido en madera, con el fin de conocer sus propiedades físico-mecánicas para su restauración y conservación (Carrillo, 2022; Carrillo y Carreón, 2019; Carrillo y Carreón, 2020; Carrillo y Carreón, 2021; Carrillo et al., 2018a; Carrillo et al., 2020; Carrillo et al., 2018b; Carrillo et al., 2019).

Finalmente, los resultados del análisis indican que estas vigas podrían tener una antigüedad entre los 100 y los 150 años. Este intervalo de edad se determinó con base en otros estudios sobre componentes químicos de maderas de reciente corta y maderas recuperadas de edificaciones restauradas o renovadas, en las cuales es posible saber el periodo de vida útil (Kránitz et al., 2014; Kránitz et al., 2014; Kránitz et al., 2016).

En México se está comenzando con este tipo de estudios a maderas estructurales históricas y este trabajo se suma a los ya existentes internacionalmente con las peculiaridades de las especies mexicanas.

CONCLUSIONES

Se determinaron los componentes químicos básicos de las tres cabezas de vigas de madera de pino del edificio de La Mitra de la ciudad de Morelia, tanto en la zona de albura como de duramen de madera sana y deteriorada. Se cumple así con el objetivo planteado en esta investigación a través de los análisis de contenido de humedad, pH, contenido de cenizas, extraíbles totales, solubles en solventes orgánicos y en agua caliente, contenido de lignina y contenido de holocelulosa, contribuyendo al conocimiento químico de los pinos del país. La composición química básica de las



muestras estudiadas coincide en general con datos de la literatura para maderas de pino mexicanas y extranjeras.

El pH, la solubilidad en sosa, la holocelulosa y la lignina presentaron una variación estadística significativa ($P < 0,05$) entre albura y duramen en las zonas sanas y deterioradas. No obstante, el análisis químico de todas las muestras de madera indica que las vigas estudiadas presentan valores de porcentajes de ceniza, de extraíbles, de holocelulosa y de lignina que permiten concluir que la madera estudiada aun no presenta degradaciones importantes en su composición química, por lo que pueden ser detectadas también sus propiedades físico-mecánicas por medio de técnicas no destructivas, tales como la aplicación de técnicas de ultrasonido.

RECONOCIMIENTOS

La investigación fue patrocinada por el Conacyt y por el Programa de Doctorado Ciencias y Tecnología de la Madera, de la Facultad de Ingeniería y Tecnología de la Madera, de la Universidad San de Michoacán Nicolás de Hidalgo, en Morelia, Michoacán, México. Los autores agradecen el apoyo brindado para esta investigación a las autoridades de la Catedral Metropolitano de Morelia (Presbítero Humberto González Correa, Custodio del Edificio de la Santa Mitra de la Catedral Metropolitana de Morelia) y a la Comisión de Arte Sacro de la Arquidiócesis de Morelia por el apoyo y la donación del material para esta investigación.

REFERENCIAS

- Ambriz Parra, J. E., Guridi-Gómez L. I., Martínez-Sánchez, G. I., & Ochoa-Álvarez, T. (2002). Anatomía de la madera e índices de calidad de pulpa de dos variedades de pino lacio (*Pinus michoacana* var. *michoacana* Martínez y *Pinus michoacana* var. *cornuta* Martínez), de un bosque de Pino-encino del municipio de Morelia, Michoacán, México. *Ciencia y Tecnología de la Madera*, 7, 2-16.
- Aquino-González, L. V., Rodríguez-Ramírez, J., Méndez-Lagunas, L. L., & Sandoval-Torres, S. (2010). Evaluación de programas de secado para madera de chalamite (*Pinus pseudostrobus*). *Madera y Bosques*, 16(2), 35-46. <https://doi.org/10.21829/myb.2010.1621171>
- Ávila Calderón, L. E. A. (2011). Evaluación de los componentes químicos básicos de la madera de *Pinus pringlei* infectada por el muérdago *Psittacanthus macrantherus*. *Ciencia Nicolaita*, 54, 7-16.
- Ávila Calderón, L. E. A., & Herrera Ferreyra, M. A. (2012). Efecto de los extraíbles en tres propiedades físicas de la madera de *Enterolobium cyclocarpum* procedente de Michoacán, México. *Bosque*, 33(2), 227-232. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002012000200013>
- Ávila Calderón, L. E. A., & Rutiaga Quiñones, J. G. (2014). Componentes químicos de la madera y la corteza de *Haematoxylum brasiletto* Karsten (Leguminosae). *Maderas y Bosques*, 20(2), 153-158. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.202171>
- Balaban, M., & Yilgör, N. (1995). The acidity of hardwoods and softwoods grown in Turkey. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 53(5), 332. <https://doi.org/10.1007/s001070050101>
- Bárcenas-Pazos, G., & Dávalos-Sotelo, R. (1999). Efecto de la lignina en las contracciones de la madera: revisión bibliográfica. *Madera y Bosques*, 5(1), 13-26. <https://doi.org/10.21829/myb.1999.511351>
- Bernabé-Santiago, R., Ávila-Calderón, L. E. A., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2013). Componentes químicos de la madera de cinco especies de pino del municipio de Morelia, Michoacán. *Madera y Bosques*, 19(2), 21-35. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.192338>
- Bertoloni Cestari, C., Cestari, L., Corradino, G., Luca, D., Crivellano, A., Marzi, T., & Panosch, P. (2010). Hidden architecture. Restoration of historic timber structures: the great roof structures of the Cathedral of Vercelli. En M. C. Forde (Ed.), *Structural Faults & Repair 2010: 13th International Conference and Exhibition Edinburgh, UK, 15 th17th June 2010* (pp. 1-12). Engineering Technics.
- Branco, J. M., Sousa, H. S., & Tsakanika, E. (2017). Non-destructive assessment, full-scale load-carrying tests, and local interventions on two historic timber collar roof trusses. *Engineering Structures*, 140, 209-224. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.053>
- Bodig, J., & Jayne, B. A. (1993). *Mechanics of wood and wood composites*. Krieger Publishing Company.
- Carrillo G., M. I. (2022). Comparación del módulo de young empleando técnicas no destructiva y destructiva en madera de recuperación in situ y laboratorio. En 19º Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales. Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales (Vol. 19, pp. 330-340). Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Carrillo G., M. I., & Carreón G., H. G. (2019). Ultrasonic determination of the elastic and shear modulus on aged wood. En A. L. Gyekenyesi, T. Y. Yu, H. F. Wu, & P. J. Shull (Eds.), *Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, Civil*

- Infrastructure, and Transportation XIII* (Vol. 10971, pp. 523-52). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2513294>
- Carrillo G., M. I., & Carreón G., H. G. (2020). Study of the degradation effects on aged wood beams from the Cathedral of Morelia, Mexico by acoustic birefringence measurements. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 56(12), 1042-1049. <https://doi.org/10.1134/S1061830921010034>
- Carrillo, M., Carreón, H., & Raya G., D. (2020). Determination of the acoustic anisotropy on a recent and aged mexican pine wood by ultrasound. En T. Y. Yu, H. F. Wu, P. J. Shull, & A. L. Gyekenyesi (Eds.), *Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, Civil Infrastructure, and Transportation XIV* (Vol. 11380, pp. 227-232). <https://doi.org/10.1117/12.2557085>
- Carrillo G., M. I., & Carreón G., H. G. (2021). Determination of the ultrasonic velocity on a recent and aged pine wood. En T. Kundu, H. Reis, J. B. Ihn, & Y. Dzenis (Eds.), *48th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* (V001T21A001). ASME. <https://doi.org/10.1115/QNDE2021-74998>
- Carrillo G., M. I., Carreón G., H. G., & Cruz L., J. (2018a). *Estudio microestructural de madera de Pinus pseudostrobus sana y deteriorada*. En 14º Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales (Vol. 14, pp. 231-239). Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Carrillo G., M. I., Cruz L., J., & Carreón G., H. G. (2018b). *Mediciones de la velocidad ultrasónica en madera de pino sana y deteriorada*. En 15º Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales. Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales (Vol. 15, pp. 356-362). Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Carrillo G., M. I., Sotomayor C., J. R., & Raya G., D. (2019). Structural analysis of wood beams by non-destructive methods in restoration works of the Cathedral of Morelia, Mexico. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Vol. XLII-2/W15, 263-270). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-263-2019>.
- Cavalli, A., Cibecchini, D., Togni, M., & Sousa, H. S. (2016). A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber. *Construction and Building Materials*, 114, 681-687.
- European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research [COST] (2006). *Memorandum of Understanding (MoU) for the implementation of a European Concerted Research Action designated as COST Action IE0601: Wood Science for Conservation of Cultural Heritage (WoodCultHer)*. COST. <https://www.cost.eu/actions/IE0601/>
- Cruz de León, J., & Ambriz-Parra, J. E. (2004). Impregnación de madera en autoclave con sales de cobre, cromo y arsénico por el método Bethell. *Ciencia Nicolaita*, 37, 177-188.
- Entwistle, K. M., & Zadoroshnyj, A. (2008). The recovery of mechano-sorptive creep strains. *Journal of Materials Science*, 43(3), 967-973. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-2138-0>
- Fengel, D. (1991). Aging and fossilization of wood and its components. *Wood Science and Technology*, 25(3), 153-177. <https://doi.org/10.1007/BF00223468>
- Fengel, D., & Wegener, G. (1989). *Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Walter de Gruyter.
- Fonseca, M. (2006). *Determinación de la composición química de la madera de pino candelillo (Pinus maximinoi H. E. Moore) procedente de la finca Río Frío, Tactic, Alta Verapaz* (Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala).
- Ghavidel, A., Scheglov, A., Karius, V., Carsten, M., Tarmian, A., Vasilache, V., & Sandu, I. (2020). In-depth studies on the modifying effects of natural ageing on the chemical structure of european spruce (*Picea abies*) and silver fir (*Abies alba*) woods. *Journal of Wood Science*, 66(1), 77. <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01924-w>
- González Pimentel, M. R. (2005). *Determinación de la composición química de la madera del pino ocote (Pinus oocarpa Schiede ex Schltdl) procedente de plantación en Cuanjá, Tucurí, Alta Verapaz* (Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala).
- Herrera Ferreyra, M. A., & Bocanegra Ojeda, S. (1996). Características físico-mecánicas de la madera de 15 especies del municipio de Morelia. *Ciencia y Tecnología de la Madera*, 1, 3-11.
- Honorato Salazar, A., & Hernández Pérez, J. (1998). Determinación de componentes químicos de la madera de cinco especies de encino del estado de Puebla. *Madera y Bosques*, 4(2), 79-93. <https://doi.org/10.21829/myb.1998.421361>
- Hunt, D. G. (1986). The mechano-sorptive creep susceptibility of 2 softwoods and its relation to some other materials properties. *Journal of Materials Science*, 21(6), 2088-2096. <https://doi.org/10.1007/BF00547951>
- Consejo Internacional de Monumentos y Sitios [Icomos] (2017). Principios para la Conservación del Patrimonio construido en madera. Icomos.
- Kránitz, K., Deublein, M., & Niemz, P. (2014). Determination of dynamic elastic moduli and shear moduli of aged wood by means of ultrasonic devices. *Materials and Structures*, 47, 925-936. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0103-8>



- Kránitz, K., Sonderegger, W., Bues, C. T., & Niemz, P. (2016). Effects of aging on wood: a literature review. *Wood Science and Technology*, 50(1), 7-22. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0766-0>
- Kirlov, A. (1980). Toward the re-appraisal of the influence of basic wood characteristics on sawblade potential. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 38(4), 145-149. <https://doi.org/10.1007/BF02612681>
- Kohara, J., & Okamoto, H. (1955). Studies of Japanese old timbers. *Scientific Reports of the Saikyo University (Agriculture) Kyoto*, 7(1), 9-20.
- Madrigal Sánchez, X., & Guridi-Gómez, L. I. (2002). Los árboles silvestres del municipio de Morelia, Michoacán, México. *Ciencia Nicolaita*, 33, 29-58.
- Ochoa Álvarez, M. T. (2003). *Características anatómicas mesurables e índices de calidad de pulpa de la madera de 11 especies de pino del municipio de Morelia, Michoacán* (Tesis de licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo).
- Ortega-Escalona, E. (2001). Densidad básica y longitud de traqueidas en la madera de cinco familias de *Pinus patula* Schlehd. & Cham. en dos sitios del estado de Veracruz, México. *Ciencia y Tecnología de la Madera*, 2(5), 21-41.
- de la Paz-Pérez Olvera, C., & Dávalos-Sotelo, R. (2016). Anatomía de la madera de seis especies de *Pinus* (Pinaceae) del estado de Durango, México. *Madera y bosques*, 22(3), 113-132. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.2231460>
- Poblete, H., Rodríguez, S., & Zárate, M. (1991). *Extraíbles de la madera, sus características y efectos sobre la utilización de esta materia prima*. Universidad Austral de Chile.
- Poblete, H., & Roffael, E. (2004). Acidez de la corteza de algunas especies nativas chilenas. *Bosque*, 25(3), 73-78. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002004000300008>
- Revilla González, E. (2011). *Química de la madera de cuatro pinos mexicanos de la subsección cembroides* (Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo).
- Rivero-Cruz, J. F. (2008). Antimicrobial compounds isolated from *Haematoxylon brasiletto*. *Journal of Ethnopharmacology*, 119(1), 99-103. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2008.06.005>
- Rodríguez-Liñán, C., & Rubio H., P. (1995). Evaluación del estado de la madera en obras de rehabilitación mediante técnicas de ultrasonidos y obtención de parámetros resistentes. *Informes de la Construcción*, 47(440), 5-22.
- Rodríguez L., M. E. (2005). *Determinación de los componentes químicos de la madera de pino blanco (Pinus pseudostrobus Lindl.) proveniente de la finca Las Victorias, Patzún, Chimaltenango* (Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala).
- Rojas G., F., & Villers R., L. (2005). Comparación de dos métodos para estimar la densidad de la madera de *Pinus hartwegii* Lindl. del volcán La Malinche. *Madera y Bosques*, 11(1), 63-71. <https://doi.org/10.21829/myb.2005.1111262>
- Rowell, R. (2005). *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Taylor & Francis.
- Rutiaga Quiñones, J. G. (2001). *Chemische und biologische Untersuchungen zum Verhalten dauerhafter Holzarten und ihrer Extrakte gegenüber holzabbauenden Pilzen*. Buchverlag Gräfelfing.
- Sandermann, W., & Rothkamm, M. (1959). Über die Bestimmung der pH-Werte von Handelshölzern und deren Bedeutung für die Praxis. *Holz-Roh-und Werkstoff*, 17, 433-440. <https://doi.org/10.1007/BF02605386>
- Silva-Arredondo, F. M., & Návar-Cháidez, J. J. (2012). Estimación de la densidad de madera en árboles de comunidades forestales templadas del norte del estado de Durango, México. *Madera y Bosques*, 18(1), 77-88. <https://doi.org/10.21829/myb.2012.1811139>
- Smith, I., Landis, E., & Gong, M. (2003). *Fracture and fatigue in wood*. John Wiley & Sons.
- Sotomayor-Castellanos, J. R., García Mariscal, L. J., & Moya-Lara, C. E. (2010). Higroscopía y anisotropía de la madera de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*. Higrocontracción, velocidad del ultrasonido y módulo de elasticidad dinámico. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 6(3), 3-32.
- StatSoft Inc. (2005). *Sistema de software de análisis de datos STATISTICA*, versión 7.1. <http://www.statsoft.com>
- Technical Association for the Pulp and Paper Industries (TAPPI) (2000a). *T 211. om-93 Ash in wood, pulp, paper, and paperboard: combustion at 525°C*. TAPPI Press.
- Technical Association for the Pulp and Paper Industries (TAPPI) (2000b). *T 212. om-98 One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp*. TAPPI Press.
- Technical Association for the Pulp and Paper Industries (TAPPI) (2000c). *T 222. om-98 Acid-insoluble lignin in wood and pulp*. TAPPI Press.
- Wise L. E., Murphy, M., & D'Addieco, A. A. (1946). Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on the hemicelluloses. *Paper Trade Journal*, 122(2), 35-43.

Manuscrito recibido el 04 de junio de 2021

Aceptado el 31 de enero de 2023

Publicado el 09 de mayo de 2023

Este documento se debe citar como:

Carrillo Gómez, M. I., Raya González, D., & Ávila Calderón, L. E. A. (2023). Componentes químicos de madera de pino deteriorada de vigas del edificio de la Mitra en Morelia, México. *Madera y Bosques*, 29(I), e2912372. <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2912372>



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.