



DOI: [10.29298/rmcf.v15i84.1441](https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i84.1441)

Artículo de Revisión

Métodos destacados para la protección de la madera

Prominent wood protection methods

Víctor Daniel Núñez-Retana¹, Marco Aurelio González-Tagle¹, Humberto González-Rodríguez¹, María Inés Yáñez-Díaz¹, Wibke Himmelsbach^{1*}

Fecha de recepción/Reception date: 14 de septiembre de 2023

Fecha de aceptación/Acceptance date: 23 de mayo del 2024

¹Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: wibke.himmelsbach@uanl.edu.mx

*Corresponding author; e-mail: wibke.himmelsbach@uanl.edu.mx

Resumen

La madera es un material ampliamente usado en construcción, muebles, entre otras aplicaciones. Para mantener su calidad y durabilidad se emplean tecnologías de protección contra daños biológicos y los efectos del agua, la temperatura y la radiación que afectan sus propiedades físicas y mecánicas. En el presente trabajo se realizó una revisión de los tratamientos disponibles y se evaluaron sus ventajas e inconvenientes, además se definieron los criterios para su utilización. La temática se dividió en dos secciones: (I) los agentes degradadores de la madera, y (II) una clasificación de tecnologías de protección que incluyó tanto métodos tradicionales, como enfoques novedosos, tal es el caso de la nanotecnología. Bajo este enfoque, las conclusiones obtenidas apuntan a que diversos tratamientos químicos tradicionales reducen, sustancialmente, el daño biológico y la absorción de humedad en la madera. No obstante, deben considerarse los posibles efectos a la salud y al ambiente. Por otra parte, si se emplean tratamientos térmicos, la estabilidad dimensional de la madera mejora. El uso de compuestos nanométricos para la protección de la madera es una técnica muy prometedora y en creciente desarrollo. Sin embargo, es una tecnología de especial cuidado porque los nanomateriales tienen que ser tóxicos para los agentes causantes del biodeterioro, pero inocuos o menos peligrosos para los humanos y el ambiente.

Palabras clave: Degradación de la madera, durabilidad, nanotecnología, protección de la madera, tratamientos químicos, tratamientos térmicos.

Abstract

Wood is a material widely used in construction, furniture, and other applications. Technologies are used to protect its quality and durability against biological damage and the effects of water, temperature and radiation that affect its physical and mechanical properties. The present work reviews the available treatments, evaluates their advantages and disadvantages, and defines the criteria for their use. The theme was divided into two sections: (I) Wood degrading agents, and (II) A classification of protection technologies that included both the traditional methods and novel approaches such as nanotechnology. The conclusions obtained with this approach point to the fact that several traditional chemical treatments substantially reduce biological damage and moisture absorption in wood. However, potential health and environmental effects should be considered. On the other hand, the dimensional stability of the wood is improved through the use of heat treatments. The use of nanometric composites for wood protection is a very promising technique that is under increasing development. However, it is a technology that requires special care because the nanomaterials must be toxic to the agents causing biodeterioration, but harmless or less hazardous to humans and the environment.

Key words: Wood degradation, durability, nanotechnology, wood protection, chemical treatments, heat treatments.

Introducción

Según la FAO (2022), la producción industrial mundial anual de madera en 2020 fue alrededor de 3.9 billones de metros cúbicos destinados a combustible o madera en rollo, 473 millones de metros cúbicos se produjeron como madera aserrada y 367 millones de metros cúbicos como materiales derivados de la madera. Se prevé que la demanda de estos productos, principalmente madera en rollo, alcance los 6 billones de metros cúbicos para el año 2050 (Barua *et al.*, 2014).

La protección de la madera es crucial en el mercado global maderero, ya que enfrenta el reto de preservarla contra la biodegradación y la exposición al agua. Este desafío puede resolverse con la ayuda de tecnologías de protección (Chen *et al.*, 2020). En respuesta, se han desarrollado métodos para el tratamiento de la madera mediante diferentes estrategias de protección con el fin de mejorar su resistencia a la biodegradación.

En ese aspecto, la calidad, protección y la resistencia a la degradación de los productos maderables dependen de factores como la humedad ambiental, la temperatura, la densidad de la madera y tratamientos de protección (Gérardin, 2016).

La norma UNE-EN 350:2016 (Asociación Española de Normalización, 2017) clasifica la madera en cuatro categorías según su facilidad de tratamiento: Clase I, fácil de tratar; Clase II, moderadamente fácil de tratar; Clase III, difícil de tratar; y Clase IV, extremadamente difícil de tratar. Esta norma establece los métodos para evaluar y clasificar la durabilidad de la madera, entendida como su

capacidad para resistir el deterioro y la descomposición frente a hongos, termitas y organismos marinos (Reinprecht, 2016), aplicables incluso a maderas tratadas o modificadas. El uso de dicha norma es crucial para proporcionar un marco estandarizado reconocido que permita la comparación y añada credibilidad, ya que se respalda la información con estándares aceptados y ofrece orientación práctica a través de criterios y ensayos específicos. Además, su referencia es fundamental para determinar la calidad comercial de la madera.

En ese sentido, en los últimos años se han realizado diversos trabajos para mostrar alternativas asequibles y amigables con el ambiente para la protección de la madera. Algunos de estos tratamientos de protección son bien conocidos y ampliamente utilizados en la industria, como los tradicionales descritos por Peraza (2002), y otros son más novedosos que implican técnicas nanotecnológicas como las descritas por Teng *et al.* (2018) y Jasmani *et al.* (2020).

El objetivo de este trabajo es proporcionar una revisión general de las técnicas destacadas y actualmente disponibles para la protección de la madera, así como evaluar sus ventajas e inconvenientes. Primero, se abordarán los agentes degradadores de la madera, seguido de una clasificación de tecnologías de protección que incluye desde métodos tradicionales, hasta enfoques modernos y novedosos, como la nanotecnología.

Agentes degradadores de la madera

En el Cuadro 1 se presenta una clasificación de los agentes más importantes que afectan la durabilidad de la madera, sus efectos y las investigaciones de referencia más recientes en las que se proponen distintos tratamientos de protección. En

general, se distinguen agentes bióticos y abióticos. Los primeros se refieren a organismos vivos, mientras que los segundos a componentes físicos y químicos del ambiente.

Cuadro 1. Factores que influyen en la degradación de la madera, daños y tratamientos de protección propuestos.

	Agentes	Daños	Tratamientos propuestos	Investigaciones de referencia
Bióticos	Microorganismos xilófagos	Propiedades mecánicas Daños estructurales en la pared celular de la madera Coloración	Acetilación Furfurilación	Goodell <i>et al.</i> (2020) Broda (2020) Martha <i>et al.</i> (2021) Marais <i>et al.</i> (2022)
	Insectos xilófagos (termitas)	Destrucción de las paredes celulares Daños mecánicos Daños estéticos	Impregnación de resinas o polisacáridos solubles	Rust y Su (2012) Yang <i>et al.</i> (2022)
	Crustáceos y bivalvos	Perforaciones en la madera usada en embarcaciones	Impregnación de resinas o polisacáridos solubles Tratamientos nanotecnológicos	Marais <i>et al.</i> (2022)
Abióticos	Agua	Contracción e hinchamiento Disolución de partículas y compuestos Provoca el desarrollo de hongos Decoloración	Acetilación DMDHEU (1,3-dimetiol-4,5-dihidroxietilenurea) Tratamientos nanotecnológicos	Rowell (2020) Wang <i>et al.</i> (2021) Goodell <i>et al.</i> (2020) Marais <i>et al.</i> (2022)
	Rayos UV	Coloración Degradación de componentes superficiales (lignina, hemicelulosa)	Impregnación de resinas o polisacáridos solubles Tratamiento térmico Tratamientos nanotecnológicos	McKinley <i>et al.</i> (2019) De Avila <i>et al.</i> (2019)
	Descomposición térmica	Eliminación de compuestos volátiles Degradación superficial	DMDHEU (1,3-dimetiol-4,5-dihidroxietilenurea) Tratamiento térmico	Reinprecht (2016) De Avila <i>et al.</i> (2019)
	Degradación por compuestos químicos (álcalis, detergentes, ácidos)	Degradación de fibras de celulosa y hemicelulosa	Barnices o chapas protectoras Impregnación de resinas o polisacáridos solubles Tratamientos nanotecnológicos	Peraza (2002) Xu <i>et al.</i> (2020)

Los principales factores de degradación de la madera, entendida como los daños a la estructura maderable que pueden iniciar, tanto a niveles superiores como moleculares incluyen agentes abióticos o atmosféricos como la humedad, los rayos UV y la temperatura, junto con organismos xilófagos (Reinprecht, 2016). La exposición a la luz solar y la descomposición térmica afectan la adhesión de recubrimientos y la apariencia de estructuras de la madera, lo que conlleva a un remplazo anticipado (McKinley *et al.*, 2019).

En cambio, las variaciones de humedad en el ambiente propician el crecimiento de microorganismos que dañan la madera, e inciden en su calidad y propiedades, especialmente en exteriores y en contacto con el suelo (Marais *et al.*, 2022).

Los principales agentes degradadores de la madera son los hongos, que causan diferentes tipos de pudrición, como la blanca, café, suave o provocada por moho y la mancha azul, esta última solo tiene un efecto estético. Los hongos, a excepción de los causantes de la mancha azul, dañan la estructura de la madera, por lo que se reduce su resistencia y atractivo visual (Broda, 2020).

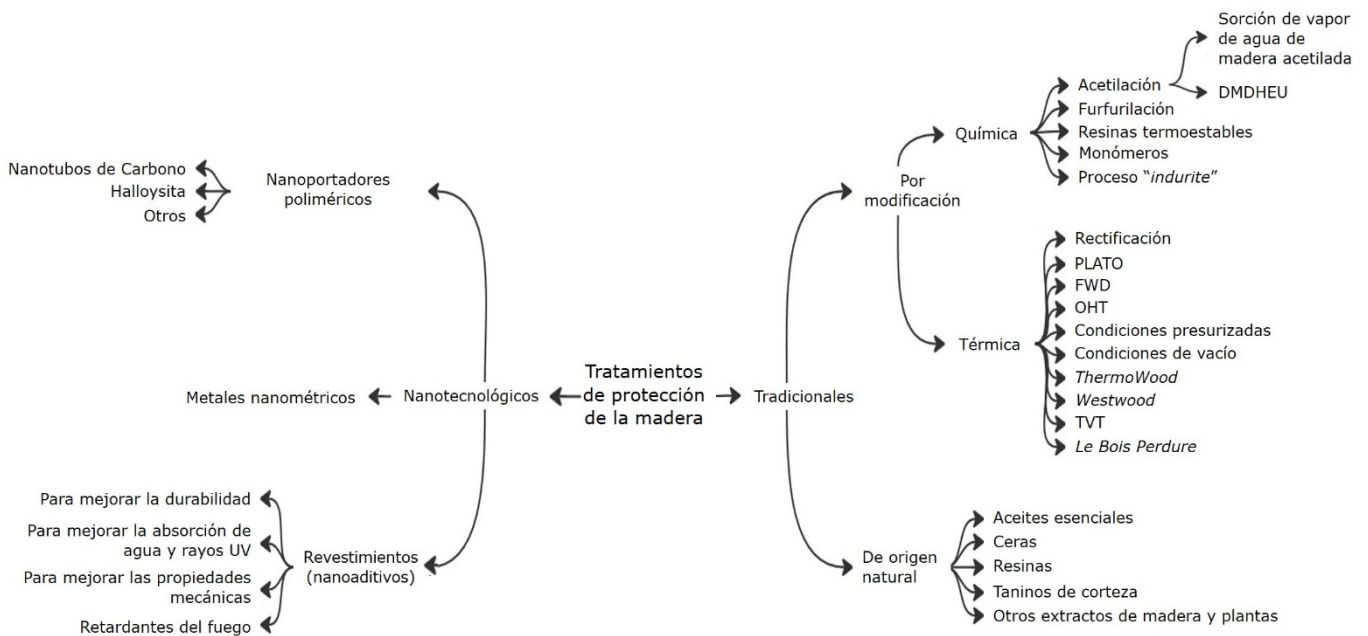
Los insectos también dañan la madera; de ellos, los más relevantes en términos económicos son las termitas. Aunque solo un pequeño porcentaje de ellas causan daños, su impacto económico global en 2010 se estimó en 40 mil millones de dólares (Rust y Su, 2012). Además, los barrenadores marinos, como crustáceos y bivalvos perforan la madera de embarcaciones, destruyéndola con el tiempo (Marais *et al.*, 2022).

Desarrollo y Discusión

Para establecer un determinado tipo de tratamiento de protección de la madera o qué preservador utilizar, se deben considerar varios aspectos. Entre estos destacan el tipo de madera por preservar (coníferas o latifoliadas), el nivel de riesgo de

deterioro al ambiente particular del servicio, la función que cumplirá la madera (estructural, ornamento, contenedores, etcétera), y el tiempo de vida útil que se requiere.

Por un lado, existen maderas duras que son resistentes y que no necesitan tratamiento alguno para su protección. Por otra parte, hay maderas blandas con menor durabilidad natural. En la Figura 1 se muestra una clasificación de las tecnologías para su protección.



Elaborado a partir de Gérardin (2016), Sandberg *et al.* (2017), Teng *et al.* (2018), Papadopoulos *et al.* (2019), Teacă *et al.* (2019), Jasmani *et al.* (2020) y Khademibami y Bobadilha (2022).

Figura 1. Tratamientos utilizados en la protección de la madera.

Tratamientos tradicionales por modificación química

En la modificación química, como tratamiento tradicional, se hace reaccionar la pared celular de la madera con monómeros u oligómeros activos de bajo peso molecular, en determinadas condiciones como el calentamiento a alta temperatura. Asimismo, se pueden introducir sustancias químicas en las cavidades celulares como lúmenes y vasos, de tal manera que bloqueen los canales físicos y se reduzca el acceso del agua en las paredes celulares de la madera (Xie *et al.*, 2013).

Al respecto, cabe mencionar que la acetilación es un proceso químico en el cual los grupos hidroxilos libres de la pared celular de la madera se convierten en grupos acetilo, y todo el peso ganado por el acetilo se convierte en unidades de grupos hidroxilo ocluidos. Esta técnica puede reducir, considerablemente, la absorción del agua y mejorar la resistencia al ataque de hongos e insectos (Yang *et al.*, 2022). Sin embargo, la acetilación presenta algunos inconvenientes como la degradación parcial de la lignina y la deformación y agrietamiento en maderas refractarias, lo que a su vez conduce a una baja calidad y rendimiento (Martins *et al.*, 2019).

Otro método es la furfurilación que consiste en impregnar la madera con alcohol furfurílico, el cual se obtiene al procesar el furfural, un compuesto derivado de subproductos de la biomasa. Esta técnica reduce la absorción del agua y por lo tanto, el ataque de hongos (Martha *et al.*, 2021). No obstante, entre sus limitaciones se incluye que el peso del catalizador debe ser pequeño para que penetre eficazmente en los poros (Bi *et al.*, 2021).

La furfurilación es adecuada para especies de madera con mayor porosidad, así como estructuras sueltas y ordenadas (Dong *et al.*, 2016). La madera tratada con alcohol furfurílico tiene mayor dureza y rigidez, buen aspecto y textura similar a la de las maderas tropicales. Puede utilizarse para tablas de entarimado. En cambio, la madera acetilada tiene mayor durabilidad biológica y estabilidad dimensional; por lo tanto, es buena no solo para productos de carpintería, sino

también para diversas aplicaciones estructurales (Mantanis, 2017); sin embargo, los costes de fabricación son más elevados (Bi *et al.*, 2021).

Entre los materiales impregnantes, las resinas constituyen un grupo muy utilizado y versátil en la protección de la madera; su objetivo principal es estabilizar o reforzar sus dimensiones, ya que se polimerizan o reticulan fácilmente (Wang *et al.*, 2021). Aunque su uso tiene inconvenientes como la posible degradación por la exposición a la intemperie, la dificultad para lograr una aplicación uniforme, y el potencial impacto ambiental asociado con compuestos químicos presentes en algunas resinas (Stefanowski *et al.*, 2018).

Schardosin *et al.* (2020) señalan que la impregnación con emulsiones de parafina podría ser un sustituto de la acetilación, si el objetivo es reducir la absorción de agua. Sin embargo, también indican que el tamaño de las partículas influye en la penetración de la cera en la madera.

Tratamientos tradicionales por modificación térmica

La modificación térmica de la madera comenzó en 1915 en Wisconsin, EE. UU., pero se dio a conocer en todo el mundo hasta las décadas de 1970 y 1980. El proceso suele ocurrir entre 150 y 240 °C y su principal objetivo es mejorar la estabilidad dimensional y resistencia microbiana (Hill *et al.*, 2021). Sin embargo, estos tratamientos presentan algunos inconvenientes. En primer lugar, afectan significativamente la resistencia a la fractura de la madera (Khademibami y Bobadilha, 2022); además, modifican el color, especialmente en maderas tropicales. El desafío actual es encontrar el equilibrio entre la mejora de la protección contra agentes y la pérdida de resistencia, conservación del color original y la mejora de los equipos utilizados en la aplicación de esos tratamientos (Gu *et al.*, 2019).

En la actualidad, existe una gran variedad de procesos para la modificación térmica de la madera. En el Cuadro 2 se listan los principales procesos comerciales de tratamiento térmico empleados en Europa.

Cuadro 2. Tratamientos utilizados para la modificación térmica de maderas.

Proceso	Temperatura (°C)	Duración (h)	Presión (MPa)	Atmósfera empleada	Referencias	
FWD (<i>Feuchte-Wärme-Duck</i>)	120-180	≈15	0.5-0.6	Vapor	Sandberg <i>et al.</i> (2017)	
	160-180		7-10 bar	Vapor saturado	Acosta-Acosta <i>et al.</i> (2021)	
PLATO (<i>Providing Lasting Advanced Timber Option</i>)	150-180/ 170-190	4-5/ 70-120/ >2 semanas	Súper atmosférica (parcialmente)	Vapor saturado/aire caliente	Sandberg <i>et al.</i> (2017)	
	150-180/ 150-190			Vapor saturado	Gérardin (2016)	
	160-190/ 170/190	4-5/3-5 días/ 14-16/2-3 días	Atmosférica	Vapor de agua	Acosta-Acosta <i>et al.</i> (2021)	
	Más de 190				Ormondroyd <i>et al.</i> (2015)	
	150-190/ 15-16 h/3 días	4-5/3 a 5 días/ 15-16 h/3 días	0.6-1	Vapor de agua/aire caliente	Reinprecht (2016)	
ThermoWood	130/ 185-215/ 80-90	30-70	Atmosférica	Vapor	Sandberg <i>et al.</i> (2017)	
	130/ 185-215	2-3		Vapor sobrecalentado	Gérardin (2016)	
	100-130/ 185-215 a 230/ 80-90			Aire caliente o vapor de agua	Reinprecht (2016)	
	185-215	2-15 h		Vapor	Acosta-Acosta <i>et al.</i> (2021)	
	185-215				Ormondroyd <i>et al.</i> (2015)	
	Le Bois <i>Perdure</i>	200-230	12-36	Atmosférica	Vapor	Sandberg <i>et al.</i> (2017)
		200-230			Inerte	Gérardin (2016)
100-120/ 200-240/ 230		Depende la especie		Nitrógeno	Acosta-Acosta <i>et al.</i> (2021) Ormondroyd <i>et al.</i> (2015)	
Rectification	160-240	8-24		Nitrógeno u otro gas	Sandberg <i>et al.</i> (2017)	

	240			Nitrógeno o CO ₂	Gérardin (2016)
	210-260			Nitrógeno con menos de 2 % oxígeno	Reinprecht (2016)
	210-240		Atmosférica <2 % de oxígeno	Gas inerte	Acosta-Acosta <i>et al.</i> (2021)
<i>OHT (Oil Heat Treatment)</i>		24-36		Aceites vegetales	Sandberg <i>et al.</i> (2017)
	180-220	2-4			Reinprecht (2016)
		18			Acosta-Acosta <i>et al.</i> (2021)
<i>TVT (Thermo-Vacuum Treatment)</i>	160-220	Más de 25	Vacío 150-350 1 000 (mbar)	Vacío	Sandberg <i>et al.</i> (2017)
	100/160-220	Más de 25	Vacío 150-350 1 000 (mbar)	Vacío	Acosta-Acosta <i>et al.</i> (2021)
<i>Westwood</i>	204				Acosta-Acosta <i>et al.</i> (2021)

*El contenido de humedad inicial de todos los procesos varía de 0 a 30 %. Las etapas de cada proceso son separadas por "/" y dependen de los tratamientos y de los autores. Modificado y ampliado a partir de Sandberg *et al.* (2017).

La elección del mejor tratamiento térmico resulta en ocasiones complicado, ya que todos los procesos tienen algunas limitaciones o desventajas técnicas o económicas. Al momento de seleccionar hay que considerar la especie y el contenido de humedad de su madera, así como la intensidad del tratamiento. Pockrandt *et al.* (2018), al comparar diferentes tratamientos térmicos de maderas duras, concluyen que el proceso *TVT* es menos destructivo que el *ThermoWood*; pero la durabilidad de la madera no mejora significativamente con el proceso *TVT*. Jebrane *et al.* (2018) citan que para maderas blandas ambos procesos conducen a resultados similares.

El análisis termogravimétrico ha demostrado que las maderas duras como la del haya, álamo, fresno y eucalipto son más susceptibles a la degradación térmica que las maderas blandas como la del pino y abeto (Candelier *et al.*, 2016). Esto se debe al

contenido de hemicelulosa en las maderas duras que contiene grupos funcionales altamente acetilados, en comparación con las maderas blandas (Martínez-Abad *et al.*, 2018).

Tratamientos tradicionales de origen natural

Los tratamientos tradicionales de origen natural suelen basarse en agua o sustancias oleosas. Los hidrosolubles se utilizan, principalmente, cuando la preservación del color de la madera es un factor importante, así como el olor de la sustancia preservadora una vez aplicada en la madera. Estos conservantes tienen el inconveniente de que no confieren estabilidad dimensional y pueden aumentar la tasa de corrosión de clavos o sujeciones metálicas (Reinprecht, 2016).

Los métodos protectores de la madera oleosolubles son una alternativa prometedora como impregnadores y aglutinantes en pinturas o en combinación con otras formulaciones (Cesprini *et al.*, 2022). Son preservadores que rellenan las cavidades de la madera por capilaridad; es decir, no se unen químicamente a las paredes celulares, por lo que es necesario asegurar una gran capacidad de retención para lograr la protección deseada (Woźniak, 2022).

Existen otros conservantes muy eficaces como la creosota y el PCF (pentaclorofenol); a pesar de no ser de origen natural, se utilizaron ampliamente en Europa y Norteamérica, pero su uso está prohibido desde 2018 debido a problemas sanitarios y ambientales (Khademibami y Bobadilha, 2022). De igual manera, las sales de cobre/cromato/arsénico (CCA), ácido/cobre/cromato (ACC), arseniato/cúprico/amoniaco (ACA), y arseniato/cúprico/zinc/amoniaco (ACZA); aunque su

aceptación actual está limitada por preocupaciones ambientales, han tenido un papel crucial en la conservación de la madera (Tarmian *et al.*, 2020).

En cambio, los compuestos naturales son sustancias renovables y fáciles de obtener, con propiedades antimicrobianas benéficas y con menor impacto ecológico que los productos químicos tradicionales (Broda, 2020). La investigación sobre la protección de la madera se centra en compuestos de plantas y animales, como aceites esenciales, ceras, resinas y taninos de la corteza de árboles, así como extractos y otros preservantes relacionados (Cesprini *et al.*, 2022; Ella *et al.*, 2022).

La heterogeneidad de la que proceden los compuestos, su menor retención dentro de la madera, su fácil lixiviación y su alta susceptibilidad a la degradación son algunas desventajas de los preservantes naturales. Por lo tanto, resultan generalmente costosos y poco rentables, lo que se traduce en un uso limitado de los mismos.

Tratamientos nanotecnológicos

La principal ventaja de las nanotecnologías en la conservación de la madera es la gran capacidad de las nanopartículas para penetrar completa y uniformemente en sus estructuras, lo que resulta en un producto de alto rendimiento físico-mecánico (Papadopoulos *et al.*, 2019). Por lo tanto, pueden mejorar la unión y la durabilidad de la madera, la resistencia a la humedad y la absorción de rayos UV, el rendimiento estructural, la protección contra incendios y reducen la lixiviación excesiva (Jasmani *et al.*, 2020).

Una de las aplicaciones de la nanotecnología en la protección de la madera es el uso de nanotransportadores poliméricos, los cuales actúan como medio de almacenamiento y

transporte para que los fungicidas y bactericidas penetren en la madera; de ellos, la matriz polimérica controla la tasa de liberación de los fungicidas y bactericidas (Teng *et al.*, 2018). No obstante, existen ciertas limitaciones como mantener el control del tamaño y la estabilidad de la suspensión de las nanopartículas durante todo el proceso, además es necesario mejorar el sistema surfactante de las nanopartículas (Bi *et al.*, 2021).

Entre los nanotransportadores potenciales están los nanotubos de carbono (CNT, por sus siglas en inglés) y la halloysita, material nanotubular natural hecho de arcilla de aluminosilicatos, barato, no tiene toxicidad y tampoco impacto ambiental negativo (Lisuzzo *et al.*, 2021).

También, hay nanometales que se sintetizan por métodos químicos en las fases gaseosa y líquida, que pueden utilizarse en mezclas con otros nanometales, o incluso en tratamientos térmicos tradicionales (Teng *et al.*, 2018). Mejoran la durabilidad de la madera de tres formas: en primer lugar, interactúan con las bacterias o desactivan las enzimas necesarias para las reacciones de degradación; en segundo lugar, no reconocen el hongo frente al metal nanométrico e impiden su desarrollo; y en tercer lugar, generan especies reactivas de oxígeno en las células fúngicas (Bi *et al.*, 2021).

Por otro lado, existen nanoaditivos usados en recubrimientos para mejorar la durabilidad de la madera. Se aplican solos o con recubrimientos tradicionales y mejoran las propiedades mecánicas, la resistencia al fuego y protegen contra el agua, y los daños causados por los rayos UV (Jasmani *et al.*, 2020). Se aplican mediante cepillado, inmersión, o polimerización *in situ* para lograr una mejor adherencia (Bi *et al.*, 2021).

Cuando se utilizan estos materiales en un tratamiento de recubrimiento, la liberación lenta y controlada del ingrediente activo es importante debido a su efecto duradero y su mínimo impacto ambiental (Papadopoulos *et al.*, 2019). En ese sentido, la incorporación de nanopartículas de base biológica podría mejorar significativamente

el rendimiento de los compuestos existentes en los mercados tradicionales y fomentar el desarrollo de nuevos tipos de biocompuestos y mercados (Pacheco-Torgal *et al.*, 2019).

Conclusiones

La elección del mejor tratamiento de protección de la madera depende de la ponderación de aspectos ecológicos, económicos y de protección.

Para mejorar la estabilidad dimensional de la madera ante la absorción de humedad, se sugiere la acetilación sobre la furfurilación, ya que es más amigable con el ambiente, dado que se utilizan compuestos menos agresivos y potencialmente más rentables a largo plazo. Ambos métodos mejoran la efectividad de protección; destaca la acetilación por su resistencia a la humedad y descomposición, y la furfurilación por mejorar la estabilidad y resistencia, aunque esta última depende de la calidad de los productos y la precisión del proceso.

En la elección del tratamiento térmico para la madera, se sugiere considerar varias opciones en función de las propiedades específicas del proyecto. Para minimizar el impacto ambiental, tanto *FWD* como *PLATO* y *ThermoWood* ofrecen alternativas respetuosas con el ambiente, ya que evitan en gran medida el uso de productos químicos agresivos. Si la eficiencia económica es crucial, *ThermoWood* es una selección rentable a largo plazo, mientras que *FWD* y *Le Bois Perdure* implican inversiones iniciales más sustanciales. En términos de protección, todos los tratamientos térmicos proporcionan mejoras significativas en la resistencia y

durabilidad de la madera. Sin embargo, es importante considerar que el tratamiento térmico conlleva el deterioro de algunas propiedades mecánicas.

Los tratamientos de origen natural, en su mayoría respetuosos con el ambiente, ofrecen una efectiva protección contra insectos, hongos y la descomposición. Aunque la viabilidad económica depende de la sustancia específica y su disponibilidad, la posibilidad de reducir costos de mantenimiento a largo plazo debería considerarse, por lo que se recomienda emplear estos tratamientos acompañados con otros métodos.

Si se desea la aplicación de tratamientos avanzados para la protección de la madera, se sugiere la aplicación de la nanotecnología, con cautela y con un enfoque equilibrado. Es crucial evaluar la sostenibilidad de los nanomateriales, minimizando impactos ambientales. A pesar de la inversión inicial, la nanotecnología promete una protección a largo plazo y posibles ahorros económicos. Su adopción depende de abordar consideraciones ambientales y alinearla con objetivos específicos, que permitan aprovechar su potencial innovador de manera gradual y consciente.

Se reconoce la importancia de adoptar prácticas amigables con el ambiente; por lo tanto, se recomienda enfocar la investigación en la generación de soluciones para la protección de la madera que minimicen el impacto ecológico y prioricen los tratamientos de origen natural. Posteriormente, asegurarse que la elección del tratamiento cumpla con los estándares de durabilidad y resistencia indicados en los estándares de calidad internacionales; por último, buscar formas que optimicen costos, sin comprometer la integridad ambiental y la salud humana, así como la eficacia en la protección.

Agradecimientos

Al Conahcyt por la beca doctoral otorgada y a la Fundación UANL por la beca brindada para la realización de una estancia internacional. Además, expresamos nuestro agradecimiento a los revisores anónimos por sus comentarios

constructivos, los cuales han desempeñado un papel fundamental en la mejora de esta revisión bibliográfica.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Contribución por autor

Víctor Daniel Núñez-Retana: desarrollo de la idea y del manuscrito; Marco Aurelio González-Tagle, Humberto González-Rodríguez y María Inés Yáñez-Díaz: revisión del manuscrito; Wibke Himmelsbach: estructura y revisión del manuscrito.

Referencias

Acosta-Acosta, R., J. A. Montoya-Arango and E. Joma-da-Silva. 2021. Technologies applied to wood heat treatments, a review. *Scientia et Technica* 26(2):127-136. Doi: 10.22517/23447214.22641.

Asociación Española de Normalización. 2017. UNE-EN 350:2016 Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Ensayos y clasificación de la resistencia a los agentes biológicos de la madera y de los productos derivados de la madera. Asociación Española de Normalización. Madrid, MD, España. 60 p.

Barua, S. K., P. Lehtonen and T. Pahkasalo. 2014. Plantation vision: Potentials, challenges and policy options for global industrial forest plantation development. *International Forestry Review* 16(2):117-127. Doi: 10.1505/146554814811724801.

Bi, W., H. Li, D. Hui, M. Gaff, ... and M. Ashraf. 2021. Effects of chemical modification and nanotechnology on wood properties. *Nanotechnology Reviews* 10(1):978-1008. Doi: 10.1515/ntrev-2021-0065.

- Broda, M. 2020. Natural compounds for wood protection against fungi—A review. *Molecules* 25(15):1-24. Doi: 10.3390/molecules25153538.
- Candelier, K., M.-F. Thevenon, A. Petrissans, S. Dumarcay, P. Gerardin and M. Petrissans. 2016. Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review. *Annals of Forest Science* 73:571-583. Doi: 10.1007/s13595-016-0541-x.
- Cesprini, E., R. Baccini, T. Urso, M. Zanetti and G. Tondi. 2022. Quebracho-based wood preservatives: Effect of concentration and hardener on timber properties. *Coatings* 12(5):568. Doi: 10.3390/coatings12050568.
- Chen, C., Y. Kuang, S. Zhu, I. Burgert, ... and L. Hu. 2020. Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. *Nature Reviews Materials* 5:642-666. Doi: 10.1038/s41578-020-0195-z.
- De Avila D., R., R. Beltrame and D. A. Gatto. 2019. Discolouration of heat-treated fast-growing *Eucalyptus* wood exposed to natural weathering. *Cellulose Chemistry and Technology* 53(7-8):635-641. Doi: 10.35812/CelluloseChemTechnol.2019.53.62.
- Dong, Y., Y. Qin, K. Wang, Y. Yan, ... and S. Zhang. 2016. Assessment of the performance of furfurylated wood and acetylated wood: Comparison among four fast-growing wood species. *BioResources* 11(2):3679-3690. Doi: 10.15376/biores.11.2.3679-3690.
- Ella N., L.-F., C. S. A. Bopenga B., F. E. Ngohang, L. E. Mengome, S. Aboughe A. and P. Edou E. 2022. Phytochemical and anti-termite efficiency study of *Guibourtia tessmanii* (harms). Léonard (Kévazingo) bark extracts from Gabon. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 50(2):113-125. Doi: 10.5658/WOOD.2022.50.2.113.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2022. Forestry Production and Trade. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. (10 de abril de 2023).
- Gérardin, P. 2016. New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood—A review. *Annals of Forest Science* 73:559-570. Doi: 10.1007/s13595-015-0531-4.

Goodell, B., J. E. Winandy and J. J. Morrell. 2020. Fungal degradation of wood: Emerging data, new insights and changing perceptions. *Coatings* 10(12):1-19. Doi: 10.3390/coatings10121210.

Gu, L., T. Ding and N. Jiang. 2019. Development of wood heat treatment research and industrialization. *Journal of Forestry Engineering* 4(4):1-11. Doi: 10.13360/j.issn.2096-1359.2019.04.001.

Hill, C., M. Altgen and L. Rautkari. 2021. Thermal modification of wood—a review: chemical changes and hygroscopicity. *Journal of Materials Science* 56:6581-6614. Doi: 10.1007/s10853-020-05722-z.

Jasmani, L., R. Rusli, T. Khadiran, R. Jalil and S. Adnan. 2020. Application of nanotechnology in wood-based products industry: A review. *Nanoscale Research Letters* 15:207. Doi: 10.1186/s11671-020-03438-2.

Jebrane, M., M. Pockrandt, I. Cuccui, O. Allegretti, E. Uetimane and N. Terziev. 2018. Comparative study of two softwood species industrially modified by Thermowood® and Thermo-Vacuum process. *BioResources* 13(1):715-728. Doi: 10.15376/biores.13.1.715-728.

Khademibami, L. and G. S. Bobadilha. 2022. Recent developments studies on wood protection research in academia: A review. *Frontiers in Forests and Global Change* 5:1-18. Doi: 10.3389/ffgc.2022.793177.

Lisuzzo, L., T. Hueckel, G. Cavallaro, S. Sacanna and G. Lazzara. 2021. Pickering emulsions based on wax and halloysite nanotubes: An ecofriendly protocol for the treatment of archeological woods. *ACS Applied Materials & Interfaces* 13(1):1651-1661. Doi: 10.1021/acsami.0c20443.

Mantanis, G. I. 2017. Chemical modification of wood by acetylation or furfurylation: A review of the present scaled-up technologies. *BioResources* 12(2):4478-4489. Doi: 10.15376/biores.12.2.4478-4489.

Marais, B. N., C. Brischke and H. Militz. 2022. Wood durability in terrestrial and aquatic environments—A review of biotic and abiotic influence factors. *Wood Material Science & Engineering* 17(2):82-105. Doi: 10.1080/17480272.2020.1779810.

Martha, R., M. Mubarok, I. Batubara, I. S. Rahayu, ... and P. Gérardin. 2021. Effect of furfurylation treatment on technological properties of short rotation teak wood. *Journal of Materials Research and Technology* 12:1689-1699. Doi: 10.1016/j.jmrt.2021.03.092.

Martínez-Abad, A., N. Giummarella, M. Lawoko and F. Vilaplana. 2018. Differences in extractability under subcritical water reveal interconnected hemicellulose and lignin recalcitrance in birch hardwoods. *Green Chemistry* 20(11):2534-2546. Doi: 10.1039/c8gc00385h.

Martins, C., P. Santos and A. M. P. G. Dias. 2019. Portuguese hardwoods: an overview of its potential for construction purposes. *In: van de Kuilen, J.-W. and W. Gard (Edits.). 7th International Scientific Conference on Hardwood Processing. Delft University of Technology. Delft, ZH, The Netherlands. pp. 286-294.*

McKinley, P., A. Sinha and F. A. Kamke. 2019. Understanding the effect of weathering on adhesive bonds for wood composites using digital image correlation (DIC). *Holzforschung: International Journal of the Biology, Chemistry, Physics, & Technology of Wood* 73(2):155. Doi: 10.1515/hf-2018-0024.

Ormondroyd, G., M. Spear and S. Curling. 2015. Modified wood: review of efficacy and service life testing. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials* 168(4):187-203. Doi: 10.1680/coma.14.00072.

Pacheco-Torgal, F., M. V. Diamanti, A. Nazari, C. G. Granqvist, A. Pruna and S. Amirkhanian (Edits.). 2019. *Nanotechnology in eco-efficient Construction: Materials, processes and applications.* Elsevier. Duxford, Cambs., United Kingdom. 876 p.

Papadopoulos, A. N., D. N. Bikiaris, A. C. Mitropoulos and G. Z. Kyzas. 2019. Nanomaterials and chemical modifications for enhanced key wood properties: A review. *Nanomaterials* 9:607. Doi: 10.3390/nano9040607.

- Peraza S., F. 2002. Protección preventiva de la madera. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera, AITIM. Madrid, Mad., España. 437 p.
- Pockrandt, M., M. Jebrane, I. Cuccui, O. Allegretti, E. Uetimane and N. Terziev. 2018. Industrial Thermowood® and Termovuoto thermal modification of two hardwoods from Mozambique. *Holzforschung: International Journal of the Biology, Chemistry, Physics, & Technology of Wood* 72(8):701-709. Doi: 10.1515/hf-2017-0153.
- Reinprecht, L. 2016. Wood deterioration, protection and maintenance. Wiley Blackwell. Oxford, Oxon, United Kingdom. 384 p.
- Rowell, R. M. 2020. Innovation in wood preservation. *Polymers* 12(7):1-7. Doi: 10.3390/polym12071511.
- Rust, M. K. and N.-Y. Su. 2012. Managing social insects of urban importance. *Annual Review of Entomology* 57:355-375. Doi: 10.1146/annurev-ento-120710-100634.
- Sandberg, D., A. Kutnar and G. Mantanis. 2017. Wood modification technologies-a review. *iForest-Biogeosciences and Forestry* 10(6):895-908. Doi: 10.3832/ifor2380-010.
- Schardosin, F. Z., S. Nisgoski, P. H. G. Cademartori, S. R. Morrone and G. I. B. Muniz. 2020. Comparison of the effects of acetylation and paraffin emulsion impregnation in *Pinus caribaea*. *Journal of Tropical Forest Science* 32(3):237-245. Doi: 10.26525/jtfs2020.32.3.237.
- Stefanowski, B. K., M. J. Spear and A. Pitman. 2018. Review of the use of PF and related resins for modification of solid wood. *Timber* 2018:165-179. https://research.bangor.ac.uk/portal/files/20769793/Stefanowski_Review.pdf. (15 de abril de 2023).
- Tarmian, A., I. Z. Tajrishi, R. Oladi and D. Efhamisisi. 2020. Treatability of wood for pressure treatment processes: a literature review. *European Journal of Wood and Wood Products* 78(2):635-660. Doi: 10.1007/s00107-020-01541-w.

Teacă, C.-A., D. Roșu, F. Mustață, T. Rusu, ... and C.-D. Varganici. 2019. Natural bio-based products for wood coating and protection against degradation: A review. *BioResources* 14(2):4873-4901. Doi: 10.15376/BIORES.14.2.TEACA.

Teng, T.-J., M. N. M. Arip, K. Sudesh, A. Nemoikina, ... and H.-L. Lee. 2018. Conventional technology and nanotechnology in wood preservation: A review. *BioResources* 13(4):9220-9252. Doi: 10.15376/biores.13.4.Teng.

Wang, D., Q. Ling, Y. Nie, Y. Zhang, ... and F. Sun. 2021. In-situ cross-linking of waterborne epoxy resin inside wood for enhancing its dimensional stability, thermal stability, and decay resistance. *ACS Applied Polymer Materials* 3(12):6265-6273. Doi: 10.1021/acsapm.1c01070.

Woźniak, M. 2022. Antifungal agents in wood protection—A review. *Molecules* 27(19):6392. Doi: 10.3390/molecules27196392.

Xie, Y., Q. Fu, Q. Wang, Z. Xiao and H. Militz. 2013. Effects of chemical modification on the mechanical properties of wood. *European Journal of Wood and Wood Products* 71:401-416. Doi: 10.1007/s00107-013-0693-4.

Xu, E., D. Wang and L. Lin. 2020. Chemical structure and mechanical properties of wood cell walls treated with acid and alkali solution. *Forests* 11:1-11. Doi: 10.3390/f11010087.

Yang, T., C. Mei, E. Ma and J. Cao. 2022. Effects of acetylation on moisture sorption of wood under cyclically changing conditions of relative humidity. *European Journal of Wood and Wood Products* 81(4):1-13. Doi: 10.1007/s00107-022-01903-6.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC .0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.