

EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO**



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE EL SALTO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**Evaluación de la acción antifúngica y contra la retención
de radiación UV de las nanopartículas de óxido de zinc
en madera para construcción**

TESIS

**Que como requisito parcial para obtener el grado
de MAESTRA EN INGENIERÍA FORESTAL**

PRESENTA:

SELENE GUADALUPE CISNEROS CARREÓN

El Salto, Durango

noviembre de 2025

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE EL SALTO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

La presente tesis titulada:

**Evaluación de la acción antifúngica y contra la retención
de radiación UV de las nanopartículas de óxido de zinc en
madera para construcción**

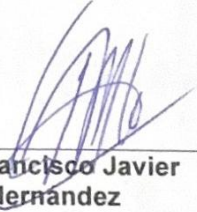
Realizada por:

SELENE GUADALUPE CISNEROS CARREÓN

**Bajo la dirección del Comité de Tesis indicado, ha sido aprobada
por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el
grado de:**

MAESTRA EN INGENIERÍA FORESTAL

COMITÉ DE TESIS

 _____ M.C Ricardo de la Cruz Carrera ASESOR	 _____ Dr. Juan Abel Nájera Luna DIRECTOR	 _____ Dr. Francisco Javier Hernández ASESOR
	 _____ M.N. Alejandro Castañeda Sáenz ASESOR EXTERNO	

DEDICATORIAS

A mis padres, María Leticia y Leonardo, por enseñarme que el amor y el esfuerzo son raíces profundas que sostienen cualquier árbol, incluso cuando el viento arrecia.

A mis hermanos, Joel y Martín, compañeros de vida, de risas y batallas. Gracias por ser refugio en la tormenta y alegría en los días grises. En ustedes encontré fuerza, lealtad y un amor que no necesita palabras.

A mi tutor, Juan Abel Nájera Luna, y a mis asesores Ricardo de la Cruz Carrera, Javier Hernández y Alejandro Castañeda, por sembrar conocimiento con generosidad y por acompañarme en este viaje con paciencia y sabiduría.

Esta tesis es un pedazo de todos ustedes. Gracias por ser parte de mi historia.

AGRADECIMIENTOS

Con profunda gratitud y emoción, quiero dedicar estas líneas a todas las personas que hicieron posible este logro académico y personal.

En primer lugar, agradezco sinceramente a mi tutor Juan Abel Nájera Luna, por su guía constante, su paciencia y por compartir conmigo su conocimiento y experiencia. Su acompañamiento fue clave en cada etapa de este trabajo.

A mis asesores Ricardo de la Cruz Carrera, Javier Hernández y Alejandro Castañeda, gracias por sus valiosas observaciones, por retarme a mejorar y por enriquecer esta investigación con sus aportes.

A mi profesor Santiago Solís, por su compromiso con la enseñanza y por inspirarme a mirar más allá de lo evidente.

Al Instituto Tecnológico de El Salto, por brindarme la oportunidad de cursar esta maestría y por ser el espacio donde crecí profesional y personalmente.

A mis padres, María Leticia y Leonardo, por su amor incondicional, por enseñarme el valor del esfuerzo y por ser mi mayor ejemplo de fortaleza. A mis hermanos Joel y Martín, por su apoyo silencioso pero constante, y por estar siempre presentes. A mi sobrina Tammy, quien aun siendo una pequeña bebe me ilumino el camino con su sonrisa y abrazos.

A mis amigos, Kevin y Daniel quienes me acompañaron en los momentos difíciles y celebraron conmigo cada pequeño avance, por escucharme cuando más lo necesitaba, por sus palabras de aliento y por su amistad sincera.

Finalmente, a mi amor de lejos, Gianpierre Estrada, por estar conmigo en cada paso de este proceso, a pesar de la distancia. Tu presencia, tu apoyo y tu fe en mí fueron fundamentales para llegar hasta aquí.

A todos ustedes, gracias por ser parte de este camino. Esta tesis también les pertenece.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	3
2.1. General	3
2.1.1. Específicos	3
2.2. Hipótesis de trabajo	3
3. REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA	4
3.1. La madera	4
3.2. La madera en la construcción	5
3.3. Degradación de madera	6
3.3.1. Agentes abióticos	6
3.3.1.1. Degradación fotoquímica	7
3.3.2. Agentes bióticos	7
3.4. Recubrimientos	10
3.4.1. Otras alternativas de recubrimientos	11
3.4.1.1. Revestimientos a base de lignina	11
3.4.1.2. Recubrimientos curables por UV	11
3.4.1.3. Recubrimientos con nanotecnología	12
3.5. La nanotecnología	12
3.5.1. La nanotecnología aplicada en la madera	13
3.5.1.1. Nanopartículas metálicas.....	14
3.5.1.2. Nanopartículas de Óxido de Zinc (ZnO)	15
3.5.2. Tipos de síntesis de nanopartículas	16
3.5.2.1. Método sol-gel	16
3.5.3. Caracterización de nanopartículas	16
3.5.3.1. Espectroscopia	17
3.5.3.2. La microscopía electrónica de barrido (SEM) y la espectroscopia de rayos X por dispersión de energía (EDS)	18
3.6. Microcosmos terrestre	18
3.7. Exposición a radiación UV	19
4. MATERIALES Y METODOS	20
4.1. Descripción del área de estudio.....	20
4.2. Métodos	20
4.2.1. Colecta del material	20
4.2.2. Síntesis de nanopartículas de óxido de zinc	21
4.2.3. Evaluación de la durabilidad de la madera mediante microcosmos terrestre.....	23
4.2.3.1. Pérdida de masa	26
4.2.3.1. Clasificación de la durabilidad de la madera por pérdida de masa	27
4.2.3.2. Pérdida del Módulo de elasticidad dinámico (MOEdin)	27
4.2.3.3. Clasificación de la pérdida del (MOEdin) en madera	28
4.2.4. Nivel de protección contra la retención de radiación UV.....	29
4.2.4.1. Cambio de brillo	32
4.2.4.2. Clasificación del cambio de brillo.....	32
4.2.4.3. Cambio de color	32
4.2.4.4. Clasificación del cambio de color	33
4.3. Procesamiento de información	33
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35

5.1.	Caracterización de nanopartículas de ZnO	35
5.2.	Pérdida de masa	37
5.2.1.	Comportamiento general de la pérdida de masa	37
5.2.2.	Pérdida de masa por tratamiento	39
5.2.3.	Clasificación de la durabilidad de la madera tratada.....	41
5.2.4.	Pérdida del MOE _{din}	42
5.2.5.	Pérdida del MOE _{din} por tratamiento	43
5.2.6.	Clasificación de la pérdida del MOE _{din}	44
5.3.	Exposición a la radiación UV	46
5.3.1.	Cambio de brillo	46
5.3.1.	Cambio de brillo por tratamiento	47
5.3.2.	Clasificación del cambio de brillo	49
5.3.3.	Cambio de color.....	49
5.3.4.	Cambio de color por tratamiento	51
5.3.5.	Clasificación del cambio de color	52
6.	CONCLUSIONES.....	54
7.	REFERENCIAS.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de la durabilidad de la madera en función a la pérdida de masa.....	27
Tabla 2. Clasificación de la degradación de la madera en función a la pérdida del MOEdin.	29
Tabla 3. Clasificación del cambio de brillo.....	32
Tabla 4. Clasificación del cambio de color.	33
Tabla 5. Análisis de varianza no paramétrica para la pérdida masa por dosis de aplicación de nanopartículas de ZnO.....	40
Tabla 6. Índice de clasificación de la durabilidad de la madera.	41
Tabla 7. Análisis de varianza no paramétrico para la pérdida del MOE dinámico por dosis de aplicación de nanopartículas de ZnO.....	43
Tabla 8. Clasificación de la durabilidad de la madera en función a la pérdida de masa.....	45
Tabla 9. Análisis de varianza para el cambio de brillo en la madera tratada con ZnO.	47
Tabla 10. Comparación de medias para el cambio de brillo en la madera tratada con ZnO.	48
Tabla 11. Comparación de medias para el cambio de color en la madera tratada por dosis de aplicación.....	49
Tabla 12. Análisis de varianza para el cambio de color en la madera tratada con ZnO.	51
Tabla 13. Valores promedio para el cambio de color en la madera tratada por dosis de aplicación....	51
Tabla 14. Comparación de medias para el cambio de color en la madera tratada por dosis de aplicación.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Propiedades de las nanopartículas metálicas.	14
Figura 2. Estructuras cristalinas de ZnO: (a) sal de roca cúbica, (b) blenda de zinc y (c) wurtzita hexagonal.	15
Figura 3. Área de estudio.	20
Figura 4. Muestras de madera: a) <i>Pinus</i> sp. Colectada y b) <i>Fagus sylvatica</i> L.	21
Figura 5. Diagrama de flujo del procedimiento sintético para las Nps-ZnO.	22
Figura 6. Síntesis de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO).	22
Figura 7. Elaboración de probetas para durabilidad de la madera.	23
Figura 8. Marcado de probetas para durabilidad de la madera.	23
Figura 9. Preparación del suelo para el ensayo de durabilidad de la madera.	24
Figura 10. Preparación de las probetas con las dosis de Npz-ZnO.	25
Figura 11. Pruebas de frecuencia en las probetas de madera.	25
Figura 12. Secado e instalación de probetas en el microcosmos terrestre.	26
Figura 13. Preparación de probetas para el ensayo contra la retención de radiación UV.	30
Figura 14. Toma de información de color y brillo de las probetas.	31
Figura 15. Exposición de las probetas a la radiación UV.	31
Figura 16. A) análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) y B) espectro de difracción de electrones (EDS) de las nanopartículas de ZnO.	35
Figura 17. Pico de absorción de las nanopartículas.	36
Figura 18. Pérdida de masa por dosis de aplicación durante las 32 semanas de exposición.	38
Figura 19. Pérdida del Módulo de elasticidad (MOE) por dosis de aplicación durante las 32 semanas de exposición.	43
Figura 20. Cambio de brillo por dosis de aplicación durante 12 meses de exposición.	47
Figura 21. Cambio de color por dosis de aplicación durante 12 meses de exposición.	50

RESUMEN

Esta investigación evaluó el efecto protector de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) aplicadas en madera de pino para mejorar su durabilidad frente a agentes biológicos y condiciones ambientales adversas. Se sintetizaron nanopartículas de ZnO mediante la síntesis sol-gel y se caracterizaron por SEM, EDS y espectrofotometría UV-Visible. Se aplicaron diferentes concentraciones (0.5, 1, 5 y 10 g·L⁻¹) sobre muestras de madera, evaluando su desempeño durante 32 semanas para el microcosmos y 12 meses para la exposición a la luz UV. Los resultados mostraron que las dosis de 0.5 y 1 g·L⁻¹ fueron las más eficaces para reducir la pérdida de masa y del módulo de elasticidad dinámico (MOEdin). Además, estas concentraciones permitieron clasificar la madera como “durable”, en contraste con el testigo y el control sin nanopartículas. En cuanto al cambio de brillo superficial bajo radiación UV, se observó un incremento proporcional a la concentración de ZnO, aunque todas las muestras se clasificaron como de alteración “moderada”. En conclusión, las nanopartículas de ZnO representan una alternativa sustentable y eficaz para la protección de la madera, con potencial para sustituir preservantes tradicionales más tóxicos.

Palabras clave: *Durabilidad, madera, nanotecnología, resistencia.*

ABSTRACT

This study evaluated the protective effect of zinc oxide (ZnO) nanoparticles applied to pine wood to enhance its durability against biological agents and adverse environmental conditions. ZnO nanoparticles were synthesized via the sol–gel method and characterized using SEM, EDS, and UV–Vis spectrophotometry. Different concentrations (0.5, 1, 5, and 10 g·L⁻¹) were applied to wood samples, and their performance was evaluated over 32 weeks under terrestrial microcosm conditions and 12 months under UV light exposure. The results showed that the 0.5 and 1 g·L⁻¹ doses were the most effective in reducing mass loss and the dynamic modulus of elasticity (MOE_{dyn}). Moreover, these concentrations allowed the wood to be classified as “durable,” in contrast to the control and untreated samples. Regarding surface gloss change under UV radiation, a proportional increase was observed with ZnO concentration, although all samples were classified as exhibiting “moderate” alteration. In conclusion, ZnO nanoparticles represent a sustainable and effective alternative for wood protection, with potential to replace more toxic conventional preservatives.

Keywords: *Durability, wood, nanotechnology, resistance.*

1. INTRODUCCIÓN

La madera es un material biológico compuesto por diversos componentes estructurales, cuya principal función es brindar soporte y facilitar el transporte de sustancias nutritivas del suelo hasta las hojas (Pozzer y Guzowski, 2011). A pesar de su resistencia debido a la composición celulósica, es susceptible a daños por organismos bióticos como hongos e insectos (Mena-Morales et al., 2023), así como por agentes abióticos externos como variaciones climáticas, insolación y humedad (Ibáñez et al., 2012).

En la industria de la construcción, la madera es altamente valorada por su resistencia, versatilidad y belleza estética (Fournier-Zepeda, 2008). No obstante, para prolongar su vida útil y mejorar su apariencia, es esencial protegerla de factores externos mediante el uso de recubrimientos adecuados (García Ortega y Benedetti-Ruiz, 2021).

A nivel global, la protección de la madera es crucial. Aunque algunos preservantes la protegen y mejoran su apariencia, contienen sustancias potencialmente peligrosas tanto para la madera como para los seres humanos (Tamarit-Urias et al., 2002; González-Ruiz et al., 2012). El desafío radica en desarrollar preservantes que no sean costosos ni nocivos (Chen et al., 2020). En respuesta, se han implementado diversas estrategias de tratamiento para mejorar la resistencia de la madera a la biodegradación (Núñez-Retana et al., 2024).

La industria de recubrimientos ha aprovechado el potencial de la nanotecnología, ya que los nanomateriales pueden ofrecer una protección superior y ser menos perjudiciales para el ambiente y la sociedad (Cueto et al., 2015). En especial, las nanopartículas de óxido de zinc son las más utilizadas debido a sus excelentes propiedades, como resistencia a la lixiviación y protección contra la radiación UV, además de sus propiedades antimicrobianas (Borges et al., 2018).

La principal ventaja de las nanotecnologías en la conservación de la madera reside en la capacidad de las nanopartículas para penetrar de manera completa y uniforme en

sus estructuras, resultando en un producto de alto rendimiento físico y mecánico (Papadopoulos et al., 2019).

Actualmente, un problema significativo es la pérdida económica debido a la degradación de la madera provocada por factores ambientales y fúngicos. Estos daños no han sido adecuadamente tratados debido al costo elevado de los tratamientos de preservación, lo que limita su disponibilidad y aceptación en el mercado. Además, la madera tratada tiene una vida útil limitada, y las técnicas de conservación actuales no favorecen económicamente a los usuarios.

El propósito de este proyecto es evaluar la efectividad de las nanopartículas de óxido de zinc en la preservación de la madera. Esta técnica innovadora, aplicada en la región de El Salto Durango, promete ofrecer una gran protección contra hongos y luz UV, su producción no es costosa y no tiene riesgos tóxicos para el medio ambiente y la salud humana, constituyéndose, así como una opción viable para prolongar la vida útil de la madera para construcción.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE TRABAJO

2.1. General

Evaluar la acción antifúngica y la retención de radiación UV de las nanopartículas de óxido de zinc aplicadas en madera para construcción.

2.1.1. Específicos

- Evaluar la durabilidad de la madera para construcción tratada con nanopartículas de óxido de zinc mediante el método de exposición de microcosmos terrestre.
- Evaluar el nivel de protección que ejerce el recubrimiento de nanopartículas de óxido de zinc contra la retención de radiación UV en madera para construcción.

2.2. Hipótesis de trabajo

La aplicación de nanopartículas de óxido de zinc en la madera para construcción garantiza protección ante factores bióticos y abióticos alargando su vida útil.

3. REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA

3.1. La madera

La madera es un producto biológico compuesto principalmente de celulosa, lignina y taninos (Honorato-Salazar y Hernández-Pérez, 2016). Esta combinación de sustancias proporciona soporte estructural a las ramas del árbol y almacena productos transformados en las hojas.

La madera se refiere a las partes de un árbol que pueden aprovecharse económicamente, como troncos, ramas y raíces. Este material natural tiene propiedades derivadas de su compleja estructura. A nivel microscópico, tiene una red de células longitudinales y transversales. La pared celular es fina y flexible al principio, endureciéndose con el tiempo debido a la acumulación de celulosa y lignina, lo que le da rigidez e impermeabilidad. Las fibras de celulosa forman un entramado donde se almacena la lignina. La madera se forma cuando la lignina se deposita en la pared celular para proporcionarle rigidez e impermeabilidad a la madera, permitiéndole soportar fuertes tensiones y resistir condiciones adversas. La combinación de estos dos componentes conforma la base estructural de la madera, garantizando su durabilidad y funcionalidad en diversas aplicaciones, especialmente en la industria de la construcción (Pozzer y Guzowski, 2012).

La madera, al ser un recurso natural renovable, presenta múltiples ventajas frente a otros materiales de construcción. Su bajo consumo energético en el procesamiento, su capacidad de aislamiento térmico y su menor impacto ambiental la hacen una opción atractiva para un desarrollo sostenible. Sin embargo, es esencial adoptar prácticas de gestión forestal responsable y tecnologías avanzadas para asegurar su uso eficiente y su preservación a largo plazo (Dávalos-Sotelo, 2016).

3.2. La madera en la construcción

García y Benedetti (2021), mencionan que, la madera es un material muy utilizado por la industria de la construcción, pues cuenta con grandes ventajas como: bajo consumo energético y no requiere de grandes industrias para su transformación. La resistencia natural que tienen algunas especies y su comportamiento ante el fuego, gracias a su densidad, le permite ser usada para fabricar una gran variedad de productos, además de las ventajas constructivas como: su adaptabilidad, su tiempo de montaje y las ventajas de confort.

La construcción en madera aborda las preocupaciones de sostenibilidad en el sector de la construcción, responsable del 37% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. Estos hallazgos destacan la importancia de incorporar la madera en la planificación y construcción urbana para cumplir los objetivos climáticos y crear ciudades más sostenibles (Labbé, 2023).

Los requisitos de la madera para la construcción abarcan aspectos como la sostenibilidad, los estándares de rendimiento y los productos de ingeniería innovadores. Dentro de la sostenibilidad se debe considerar los beneficios ambientales, especialmente en las evaluaciones del ciclo de vida, donde a menudo supera a otros materiales; las prácticas de gestión forestal sostenible son cruciales para garantizar un suministro constante de madera y, al mismo tiempo, minimizar los impactos de la deforestación (Woodard y Milner, 2015).

Dentro de los estándares de desempeño se considera el cumplimiento con normas sobre la seguridad en la construcción con madera para mejorar la integridad estructural y el rendimiento térmico (Garay et al., 2018).

Así es que la madera es un material viable que posee características interesantes como material de construcción, empezando por la relación resistencia/peso óptimo, lo que la hace adecuada para diversas aplicaciones estructurales (Blanca-Giménez et al., 2022). La madera actúa como sumidero de carbono, lo que contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los materiales

tradicionales como el hormigón y tiene excelentes propiedades de aislamiento térmico, lo que contribuye a la eficiencia energética de los edificios (Yang, 2024), además de apoyar las prácticas de construcción sostenibles, alineándose con los objetivos ambientales (Lestari-Ikaputra, 2024); asimismo proporciona una estética natural que mejora la calidad visual de los edificios (Yupa et al., 2024).

A pesar de los importantes avances que el uso del acero, hormigón y el hierro ha aportado a la construcción, la madera sigue manteniendo su popularidad. En las últimas décadas, la industria de la madera ha experimentado una notable evolución gracias al desarrollo de nuevas tecnologías que han permitido la generalización del uso de este material en la construcción (Gilabert-Sanz et al., 2024).

Según datos de la ONU, se estima que la población mundial crecerá un 25% en los próximos 30 años, pasando de 7.700 millones a 9.700 millones de personas. Este incremento conllevará a un aumento en el consumo de recursos naturales, especialmente aquellos destinados a la vivienda, lo que supondrá un reto significativo para los países. Cuando llegue ese momento, el sector de la construcción deberá actuar de manera responsable en cuanto a la preservación del medioambiente ya que tiene un doble impacto sobre el entorno: es responsable de un tercio de la generación de residuos mundiales, ya sea por construcción o demolición, y la construcción de viviendas representa el 36% del uso de energía en el mundo y el 39% de las emisiones globales de CO₂EQ (Adler y Peciña, 2022).

3.3. Degradación de madera

3.3.1. Agentes abióticos

El grado de descomposición y de pudrición de la madera se relaciona con las condiciones climáticas, incidencia de rayos UV, humedad, grado de aireación del suelo, cantidad de materia orgánica, pH, nutrientes y tiempo de exposición a los agentes de degradación (Ontiveros-Moreno et al., 2024).

3.3.1.1. Degradación fotoquímica

La madera en exposición constante al sol adopta un color marrón, siendo gris en su fase final. Esto es a causa de la radiación ultravioleta, que degrada la capa exterior de la madera, empezando por la lignina. Las células externas degradadas con el paso del tiempo son erosionadas por la lluvia, dejando a su vez una nueva capa que empezará a deteriorarse y a mostrar defectos, entonces será más propensa a recibir una infestación por mohos, tornando la madera a un color más oscuro del original (Rodríguez-Anda y Fuentes-Talavera, 2003).

3.3.2. Agentes bióticos

Los agentes bióticos involucran principalmente hongos, bacterias e insectos que descomponen la madera (Marais et al., 2020) y se dividen en tres categorías:

- Hongos xilófagos: Estos hongos se agrupan en dos tipos. Los hongos de pudrición (parda, blanca y blanda) reducen notablemente la resistencia de la madera. Los hongos cromógenos y mohos cambian la coloración de la madera sin afectar demasiado su resistencia.
- Insectos xilófagos: Atacan tanto árboles vivos como madera seca, siendo las termitas las más dañinas. Las larvas construyen galerías en la madera durante su ciclo de vida (huevo, larva, pupa e insecto adulto), lo que afecta la integridad del material.
- Xilófagos marinos: Representan una seria amenaza para la madera sumergida en agua salada, perforándola rápidamente para alimentarse o habitar en ella.

Los microorganismos que más degradan la madera son los hongos los cuales dan origen a diferentes tipos de pudrición, pero en especial los hongos más comunes son los xilófagos, los cuales combinan un complejo mecanismo de enzimas para descomponer la madera (Martín y López, 2023; Castro y Mohali, 2020). Los agentes biológicos afectan la madera porque les sirve de alimento. Algunas maderas producen

extractivos como aceites esenciales, resinas y taninos, que les proporcionan resistencia frente a hongos e insectos, acumulándose en el duramen. La albura, por otro lado, es vulnerable debido a su contenido de azúcares y almidones. Las bacterias no representan un peligro significativo para la madera; sin embargo, se ha comprobado que existen relaciones con ciertos ascomicetes que causan tipos específicos de pudrición o mancha. El *Bacillus polymixa* puede atacar la madera sumergida en agua dulce, aunque esta degradación es mínima (Novoa-Robles, 2006).

Los insectos representan uno de los principales agentes de degradación de la madera. Entre ellos, destacan los del orden coleóptera, comúnmente conocidos como escarabajos, y los isóptera, denominados termitas (comejenes u hormigas blancas). Estos tipos de insectos ocasionan numerosas pérdidas, especialmente en bosques tropicales y subtropicales. Por lo general, son de tamaño pequeño y se alimentan de materia vegetal y animal viva o muerta, ya sea en estado larvario o como adultos. Los adultos depositan sus huevos sobre la corteza cuando atacan árboles en pie, siendo el estado larvario el principal responsable de la destrucción. Estos insectos tienen la capacidad de atacar maderas nuevas, secas o viejas, tanto con corteza como sin ella, excavando galerías que reducen la madera a polvo fino. En contraste, los de orden isóptera son considerados los más peligrosos y responsables del deterioro de la madera en uso. Invaden la madera formando colonias organizadas en castas reproductoras, soldados (ninfas) y obreros. Estos insectos construyen nidos en el suelo, en el tronco o en las ramas de los árboles, y se alimentan de la celulosa contenida en la madera y sus derivados. Prefieren sitios húmedos y oscuros, evitando así la luz, lo que complica su detección. Se clasifican según sus hábitos de vida en tres grupos: termitas de madera seca, de madera húmeda y subterráneas (Arias-Cazco, 2010).

Las especies de termitas de madera seca habitan en el suelo con galerías parcialmente dispuestas y sus colonias están situadas en parte en el suelo; su actividad se desarrolla principalmente en la madera por encima del suelo. Los géneros más representativos son *Cryptotermes* y *Heterotermes*. Las termitas de madera

húmeda, por lo general, atacan la madera cuando se encuentra en forma de trozas, rollos o tocones; sus colonias son pequeñas y muchas veces carecen de obreras, siendo las ninfas las encargadas de realizar las tareas. A este grupo pertenecen las especies *Kalotermitidae*, con colonias difusas. Las termitas subterráneas habitan en la tierra y logran alcanzar la madera a través de galerías. Atacan edificaciones, puentes, construcciones de madera, cubiertas y pisos. La presencia de madera masticada en estructuras es un indicativo claro del ataque de termitas subterráneas (Vaca-de Fuentes, 1998).

La decoloración y el deterioro de la madera suelen ser causados por hongos, que atacan bajo diferentes condiciones ambientales. Estos microorganismos utilizan la madera como fuente de alimentación (Encinas, 2004). Carecen de clorofila y tejidos vasculares especializados. Son organismos eucarióticos con nutrición heterótrofa, por lo que dependen de otros organismos vivos o muertos, actuando como saprófitos (material orgánico muerto) o parásitos (organismos vivos). El ciclo de vida de los hongos empieza con las esporas, dispersadas por viento, lluvia o animales, que germinan al encontrar un sustrato adecuado de humedad y temperatura. La espora germina formando una hifa, y en conjunto crean un micelio. Una vez desarrollado suficiente micelio, forman cuerpos fructíferos (esporóforos) donde se producen nuevas esporas, completando así el ciclo.

Los hongos actúan cuando la madera está expuesta a altos contenidos de humedad, como en contacto con el suelo (postes, durmientes, columnas) o en condiciones de excesiva humidificación durante la temporada de lluvias (cabezas de vigas, zapatas y arrastres). La madera con un 20% de humedad está expuesta al ataque de hongos, mientras que con un 30% de humedad, estos encuentran un ambiente óptimo para desarrollarse. Los almidones y azúcares, junto con algunos elementos de las paredes celulares, constituyen su principal fuente de nutrientes. Pueden desarrollarse en la superficie o en aberturas como grietas de maderas en malas condiciones de conservación (humedad relativa alta, mala ventilación, contacto directo con la tierra) (González, 2012). Cuatro condiciones son esenciales para su desarrollo: existencia de

sustrato (madera), humedad, oxígeno y temperatura adecuados. La ausencia o eliminación de cualquiera de estos factores inhibe el crecimiento del hongo (Córdoba, 2009).

El ataque de los hongos sigue una secuencia: primero actúan los mohos y hongos cromógenos, seguido de los hongos de pudrición, degradando así la madera. Los hongos cromógenos y mohos no descomponen la madera, pero afectan su apariencia con manchas azules, negras o rojas. Los mohos, que se desarrollan en la superficie de la madera, juegan un papel importante en los cambios naturales, siendo agentes responsables de la desintegración de materia orgánica. Los Basidiomicetes son el grupo más importante de hongos xilófagos, capaces de causar deterioro en la madera. La característica distintiva de estos hongos es la producción de esporas en estructuras especializadas llamadas basidios, dispuestas típicamente en estratos definidos del micelio, conocido también como himenio. El micelio está formado por hifas septadas y bien desarrolladas que penetran el sustrato y absorben alimento (Bobadilla, 2004).

3.4. Recubrimientos

A lo largo de los años, el ser humano ha afrontado el reto de implementar los recubrimientos y de los beneficios que estos aportaban a los materiales. Esto ha dado origen a la investigación de nuevos recubrimientos, cada uno de ellos mejor que el otro teniendo siempre en mente los principales objetivos, proteger, aislar o decorar la superficie (Taraborelli et al., 2020; Keil et al., 2016).

Los barnices, que son técnicamente un fluido sin pigmentación, son una película delgada sólida, tienen la tarea de proteger tanto el interior como el exterior de la superficie, dando un acabado estético a la vista de las personas. En algunas ocasiones el barniz aumenta la apariencia de la superficie al brindar un brillo uniforme (Onofre-Laguna, 2000).

3.4.1. Otras alternativas de recubrimientos

3.4.1.1. Revestimientos a base de lignina

Los biopolímeros renovables provenientes de diversas fuentes naturales han ganado considerable atención recientemente debido a su aplicación en múltiples áreas, incluyendo alimentos, cosméticos, medicamentos, combustibles y materiales de construcción. En particular, la lignina, el segundo polímero natural más abundante después de la celulosa, se destaca como un material atractivo para el desarrollo de productos biodegradables y de bajo costo. Su disponibilidad, bajo costo, biocompatibilidad y propiedades únicas posicionan a la lignina como un candidato ideal para la creación de productos de alto valor agregado. En el contexto de recubrimientos para madera, la lignina se puede utilizar para desarrollar revestimientos sostenibles y biodegradables que protejan la madera de la degradación ambiental. Sus propiedades hidrofóbicas y resistencia a la radiación UV, eliminación de oxígeno, propiedades antimicrobianas y de barrera permiten la creación de recubrimientos que no solo prolongan la vida útil de la madera, sino que también reducen el impacto ambiental. Al emplear lignina en recubrimientos, se promueve una alternativa ecológica y efectiva que complementa las necesidades de la industria de la construcción sostenible (Sreejaya et al., 2022; Ruwoldt et al., 2023).

3.4.1.2. Recubrimientos curables por UV

En cuanto a la degradación fotoquímica el curado por UV tiene un alto impacto en la nueva generación de recubrimientos (Patil et al., 2023). Los recubrimientos que se curan mediante radiación ultravioleta (UV) se han convertido en una opción ecológica y sin emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOC), revolucionando sectores industriales como pinturas, recubrimientos, tintas, gráficos, madera y automoción. En particular, el recubrimiento de madera ha adoptado ampliamente esta tecnología en los países desarrollados. El curado por UV presenta múltiples ventajas, tales como secado instantáneo, capacidad de cubrir sustratos sensibles al calor, alta velocidad de

curado, y requisitos mínimos de espacio y capital para el equipo de curado (Taraborelli et al., 2020).

3.4.1.3. Recubrimientos con nanotecnología

Esta disciplina emergente ofrece una vasta e innovadora cantidad de aplicaciones y usos. En la industria de la madera, se utiliza para diseñar diferentes barnices o pinturas con aditivos de nanomateriales. La característica predominante de los nanomateriales es la facilidad de penetrar eficazmente en los sustratos de la madera, lo que mejora en gran medida su resistencia y durabilidad, así como ciertas propiedades como la hidrofobicidad, retardantes del fuego y la resistencia a la abrasión de piezas y componentes hechos de maderas resinosas, protegiéndolos tanto de la degradación por organismos biológicos como por condiciones ambientales adversas, los nanomateriales más usados en este aspecto son las nanopartículas de plata, boro, cobre, zinc, titanio pues han demostrado resultados positivos en la protección (Papadopoulos y Taghiyari, 2019; Borges et al, 2018).

3.5. La nanotecnología

Leal (2011), dice que la nanotecnología podría definirse como el campo de la ciencia dedicada al control y manipulación de la materia en la escala de los átomos y las moléculas, donde el tamaño se mide en escala nanométrica, lo cual es la millonésima parte de un metro. El término es descrito por algunos autores, como la "tecnología transformadora del siglo XXI"

El término "Nanotecnología" fue usado por primera vez en 1974 por Norio Taniguchi, un investigador de la Universidad de Tokio, quien señaló así la capacidad de manejar materiales a nivel nanométrico. En términos sencillos, "nano" es un prefijo griego que significa "enano" y abarca una amplia gama de fenómenos y objetos cuyas dimensiones son de una millonésima parte de un milímetro (1×10^{-9} m) (Medina et al., 2015). En el siglo pasado se dio a conocer más el potencial de la nanotecnología pues

se indagó más sobre las propiedades que los materiales podían tener a nano escala (Balandrán-Quintana y Mendoza-Wilson, 2021).

Los nanomateriales se pueden definir como aquellos en los que alguna de sus dimensiones se encuentra entre 1 y 100 nm, presentando distintas formas y materiales, en correspondencia con su aplicación. Los nanomateriales suelen clasificarse respecto a cuantas de sus tres dimensiones espaciales se encuentren en escala nanométrica, por ejemplo: 0D (puntos cuánticos y nanopartículas), 1D (nanotubos), 2D (nanopelículas) y 3D (policristales) (Numan, 2021).

Ijaz et al. (2020), mencionan que, dentro de los nanomateriales, las nanopartículas son ampliamente utilizadas en distintas áreas por sus propiedades ópticas, electroquímicas y mecánicas. Las nanopartículas son clasificadas por su composición, como orgánicas e inorgánicas. Las primeras, entre las que destacan dendrímeros, micelas, liposomas, partículas poliméricas, polímero-cápsulas, ferritina y polímeros mesoporos, suelen estar contruidos a base de moléculas orgánicas, mientras que las segundas, entre las que se incluyen, puntos cuánticos, partículas paramagnéticas, súper paramagnéticas, óxido metálicas y metálicas suelen estar constituidas por Au, Cu, Ag, Zn, Pb, Co, Cd, Al₂O₃, SiO₂, Fe₂O₃, TiO₂, CuO, CdSn, ZnO y ZnS.

3.5.1. La nanotecnología aplicada en la madera

Los estudios sobre la nanotecnología aplicada a la ciencia de la madera se enfocan principalmente en la estabilidad dimensional, la resistencia a microorganismos, la resistencia a la abrasión y rayos ultravioleta, excelente brillo y transparencia, hidrofobicidad, retardantes del fuego, biosidas, mayor fuerza y flexibilidad, o aislamiento, también aparecen los primeros productos como las nano maderas. Para la aplicación de las nanotecnologías puede ser de vía física, química o electroquímica, dependiendo del tipo de nanopartícula que se use. Muchas de las nanopartículas empleadas para desarrollar estos productos, como nanopartículas de ZnO, no son tóxicas. Por lo tanto, este tipo de recubrimientos aportan una ventaja adicional en la industria de los recubrimientos para madera (Goddio et al., 2013 y Cueto et al., 2015).

La mayor ventaja de usar nanotecnología en la madera es la capacidad única de las nanopartículas para penetrar profundamente en los sustratos de madera. La pared celular de la madera tiene una porosidad a escala molecular, lo que permite a las pequeñas nanopartículas penetrar fácilmente y profundamente, alterando su química superficial y mejorando sus propiedades, resultando en un producto de alto rendimiento (Papadopoulos, 2023).

3.5.1.1. Nanopartículas metálicas

Los nanometales poseen propiedades únicas como se muestra en la Figura 1, que pueden ser totalmente diferentes de las características de los metales en su estado elemental. Emergieron como una herramienta de gran potencial a las cuales en algunos casos puede observarse un efecto potencial que se atribuye al pequeño tamaño de la nanopartícula, ofertando una innovación en productos con una baja toxicidad (Castro-Longoria, 2022).

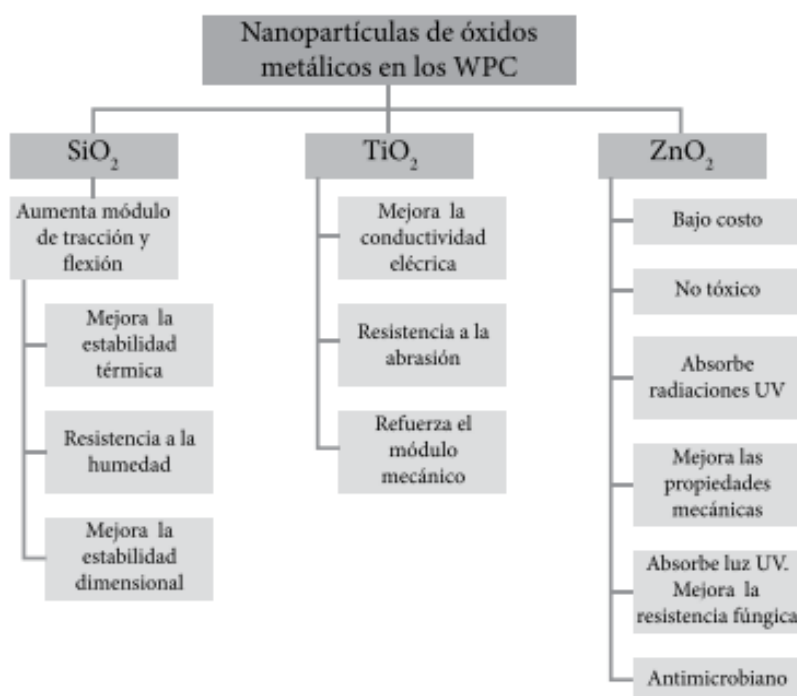


Figura 1. Propiedades de las nanopartículas metálicas.

3.5.1.2. Nanopartículas de Óxido de Zinc (ZnO)

El óxido de zinc es uno de los semiconductores más estudiados debido a sus propiedades ópticas, físicas y antimicrobianas. Productos tan comunes como protectores solares o cremas para rozaduras, contienen nanopartículas de ZnO. Las nanopartículas de ZnO tienen una gran participación en la agronomía gracias a su morfología y propiedades electroquímicas, incluyendo propiedades semiconductoras y foto catalíticas, estructura monoclinica y alta constante dieléctrica. Debido a estas propiedades hacen más fácil su interacción con las plantas, mejorando la translocación vascular a través del xilema y floema, así como la absorción foliar tras la aplicación de aerosoles (Abrica y Gómez, 2022).

De acuerdo a la Figura 2, el óxido de zinc (ZnO) cristaliza en tres estructuras diferentes, wurtzita, blenda de zinc y sal de roca bajo diferentes condiciones de crecimiento. De las tres formas estructurales, la más estable es la wurtzita, donde los átomos de oxígeno y zinc están organizados de forma que los átomos de O se sitúan en una estructura hexagonal cerrada, mientras que los átomos de Zn ocupan el centro de la estructura hexagonal distorsionada (Mauleon, 2019).

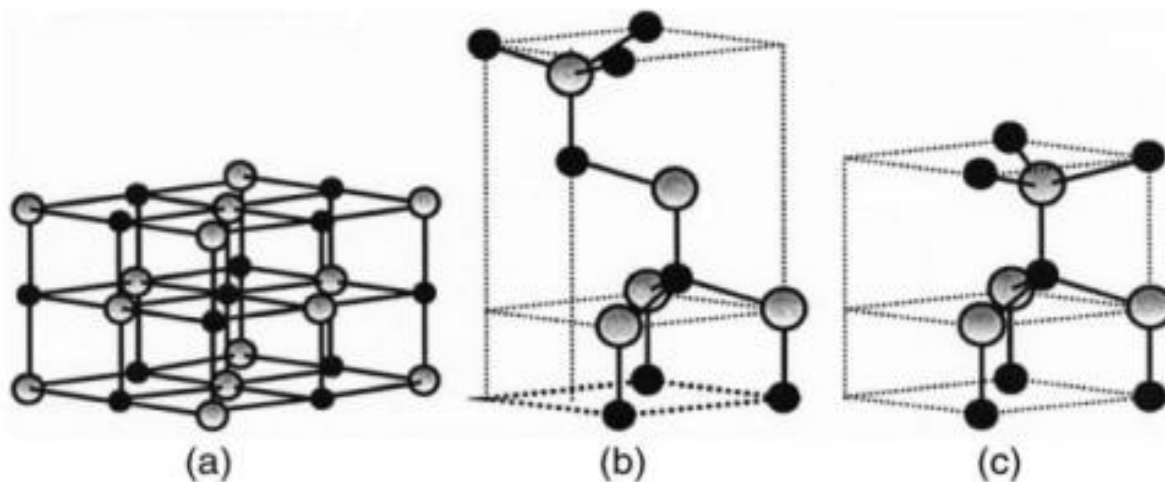


Figura 2. Estructuras cristalinas de ZnO: (a) sal de roca cúbica, (b) blenda de zinc y (c) wurtzita hexagonal.

Al ser el ZnO un material semiconductor de la familia II-V la diferencia de electronegatividades entre el zinc y el oxígeno produce un alto grado de ionicidad en su enlace, convirtiéndolo en uno de los compuestos más iónicos de dicha familia. Esto provoca una repulsión considerable entre sus nubes de carga, haciendo que su estructura cristalina más estable sea hexagonal. En esta estructura los átomos se encuentran suficientemente alejados, esto con el fin de compensar dichas repulsiones. Así, cada átomo de zinc se encuentra rodeado por un tetraedro de 4 átomos de oxígeno y viceversa, formando de esta manera una combinación alternada de planos de átomos oxígeno y de planos de átomos de zinc, las cuales se encuentran a lo largo del eje c, con un desplazamiento entre ellos de $0.38c$, siendo c su parámetro de red en la dirección vertical (Aquino-Granados, 2016).

3.5.2. Tipos de síntesis de nanopartículas

3.5.2.1. Método sol-gel

El método sol-gel es un proceso químico en fase húmeda muy usado en ciencia de materiales para fabricar nanomateriales, particularmente óxidos metálicos. Comienza con una solución química o sol que actúa como precursor de una red de partículas o polímeros. Los precursores comunes son los alcóxidos y cloruros metálicos, que pasan por reacciones de hidrólisis y policondensación para formar una dispersión coloidal, que luego se convierte lentamente en un gel. Dado que los alcóxidos son sensibles a la humedad, la hidrólisis se realiza usando alcoholes como solvente. Un gel polimérico es una red macromolecular infinita hinchada por solvente, creada cuando aumenta la concentración de la especie dispersa. El solvente queda atrapado en la red de partículas, evitando que el líquido se separe y el sólido colapse (Guerra et al., 2024).

3.5.3. Caracterización de nanopartículas

La caracterización de nanomateriales es crucial para entender o analizar el comportamiento de las nanopartículas estudiadas, pues nos da resultados como su pureza, composición y tamaño, también es importante para establecer su relación

estructura-propiedades y determinar sus potenciales aplicaciones (Fornaguera y Solans, 2018).

3.5.3.1. Espectroscopia

De acuerdo con Dendisová et al. (2018), la espectroscopía es una técnica fundamental en la caracterización de nanomateriales, ya que permite analizar sus propiedades ópticas, electrónicas y químicas mediante la interacción de la luz (u otras formas de radiación electromagnética) con la materia. Esta interacción proporciona información detallada sobre la composición, estructura y comportamiento de los nanomateriales y existen varios tipos de espectroscopía utilizados en la caracterización de nanomateriales, incluyendo:

- Espectroscopía de Absorción UV-Visible (UV-Vis): Esta técnica mide la cantidad de luz que un material absorbe en el rango ultravioleta y visible del espectro. Es útil para determinar las bandas de energía y las propiedades ópticas de los nanomateriales.
- Espectroscopía Raman: Basada en la dispersión inelástica de la luz, esta técnica proporciona información sobre las vibraciones moleculares y la estructura cristalina de los nanomateriales. Es particularmente útil para estudiar materiales como el grafeno y los nanotubos de carbono.
- Espectroscopía Infrarroja (IR): Esta técnica mide la absorción de luz infrarroja por las moléculas del material, proporcionando datos sobre los enlaces químicos y la estructura molecular de los nanomateriales.
- Espectroscopía de Fotoelectrones Emitidos por Rayos X (XPS): Analiza los electrones emitidos por un material cuando se irradia con rayos X, permitiendo estudiar la composición elemental y las condiciones químicas de la superficie de los nanomateriales.
- Espectroscopía de Resonancia Magnética Nuclear (RMN): Utiliza campos magnéticos para estudiar el entorno químico de los átomos en un material,

proporcionando información sobre la estructura y dinámica de los nanomateriales.

3.5.3.2. La microscopía electrónica de barrido (SEM) y la espectroscopia de rayos X por dispersión de energía (EDS)

La microscopia electrónica de barrido o por sus siglas en ingles SEM (Scanning Electron Microscope) es una de las mejores técnicas para caracterizar nanomateriales pues nos permite observarlos inclusive si son menores a los 10 nm, nos permite medirlas y saber su forma. Con la caracterización SEM se puede emplear varios métodos como contraste de voltaje, recolección de carga y catodoluminiscencia, esto porque cada nanomaterial es diferente lo que nos permite poder observarlos según el tipo de material que se esté usando (Hodoroaba et al., 2016).

3.6. Microcosmos terrestre

Los microcosmos del suelo o también conocidos como ecosistemas modelo terrestres, tienen un gran impacto en el área científica pues tienen una gran capacidad para simular sistemas naturales en entornos controlados. Pueden variar, desde un estudio simple hasta uno con equipos más detallados y sofisticados ofreciendo una amplia gama de posibilidades. Diversas disciplinas científicas, como la microbiología, la ecotoxicología, la limnología y la ecología del suelo han encontrado en los microcosmos una herramienta poderosa para sus estudios (Sandor y Schrader, 2012).

El objetivo principal de los estudios de microcosmos es comprender mejor el ecosistema modelo terrestre y los efectos causales que se pueden simular en ellos. Estos estudios permiten a los investigadores observar y analizar cómo los cambios en el ambiente pueden afectar a los ecosistemas, proporcionando información valiosa para la conservación y el manejo sostenible de los recursos naturales (Vidican y Sandor, 2015).

3.7. Exposición a radiación UV

Una prueba de envejecimiento natural para pinturas y barnices es un procedimiento importante para evaluar la durabilidad y resistencia de los recubrimientos, como las pinturas y los barnices, cuando se exponen a condiciones ambientales naturales durante un período prolongado. Este tipo de pruebas pretende simular los efectos de factores ambientales como la luz solar, la humedad, la temperatura, la lluvia y el viento en los revestimientos. Durante el ensayo, las muestras de pintura o recubrimiento se aplican a sustratos especiales y se colocan al aire libre o en entornos controlados que imitan condiciones naturales. Los revestimientos se exponen a los agentes atmosféricos con el tiempo y se observa y registra su degradación y sus propiedades físicas y químicas. La luz solar puede causar decoloración y daños en el revestimiento, especialmente debido a la radiación ultravioleta. La humedad y los cambios de temperatura pueden causar grietas, ampollas y escamas en la superficie del revestimiento. Además, factores como la lluvia ácida y la contaminación también pueden afectar al rendimiento del revestimiento. Los resultados de estas pruebas permiten a los fabricantes de pinturas y barnices mejorar las formulaciones de sus productos para aumentar su durabilidad y resistencia en condiciones ambientales adversas. De esta manera, los consumidores pueden contar con productos de calidad y sostenibles para proteger y decorar diferentes superficies. Estas pruebas son fundamentales para garantizar la calidad y el rendimiento de los recubrimientos en aplicaciones prácticas y proporcionan información valiosa para fabricantes y usuarios finales (Durbán et al., 2019).

4. MATERIALES Y METODOS

4.1. Descripción del área de estudio

El trabajo se desarrolló en la región forestal de El Salto, Durango, específicamente en el Instituto Tecnológico de El Salto (ITES) cuya dirección es: Calle Tecnológico No. 101 Colonia La Forestal C.P. 34942 (Figura 3).



Figura 3. Área de estudio.

4.2. Métodos

4.2.1. Colecta del material

La madera utilizada en este trabajo corresponde a la del género *Pinus* sp la cual fue colectada en diversos aserraderos de la región de El Salto, Durango. Las características de la madera colectada cumplieron con los lineamientos establecidos en la norma NMX-C-239-ONNCCE-2014 referida a las especificaciones y métodos de ensayo para la calificación y clasificación visual de madera dimensionada de pino para

usos estructurales (ONNCCE, 2014), y la NMX-C-224-ONNCCE-2001 referida a las dimensiones de la madera aserrada para su uso en la construcción (ONNCCE, 2001). Se utilizó madera de *Fagus sylvatica* L. como especie testigo según los requisitos que marca la Pre-norma Europea 807 (European Committee for Standardization, 2001) (Figura 4).



Figura 4. Muestras de madera: a) *Pinus* sp. Colectada y b) *Fagus sylvatica* L.

4.2.2. Síntesis de nanopartículas de óxido de zinc

La metodología a utilizar para la formación de las nanopartículas es el método sol-gel (Aquino, 2016), el cual consiste en usar un precursor el cual fue acetato de zinc anhidro $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, la producción de Nps-ZnO consistió en una reacción entre el NaOH 0,1M con $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 0,5M a una temperatura controlada de 50°C. Para la síntesis se disolvió NaOH en 250 mL de agua desionizada a una concentración de 0,1 M. La solución resultante se trató bajo agitación constante a una temperatura de reacción de 50°C. Después de obtener la temperatura deseada, se midió el pH (13.02) de la solución con ayuda del pH-metro y se adicionó lentamente 25 mL (0,18 mL/min) de la solución de $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ al 0,5 M (goteo durante 2 horas y 20 min) hasta llegar a un pH 7. Este procedimiento se llevó a cabo bajo agitación magnética dando como resultado la precipitación inmediata de Nps-ZnO y el color de la solución cambia de incoloro a blanco.

El compuesto formado se filtró empleando papel Whattman #40, se lavó varias veces con agua destilada y se secó en la estufa a una temperatura de 70 °C durante 12 horas.

Luego se llevó a calcinación a una temperatura de 600°C por 3 horas para producir la siguiente reacción global: (Figuras 5 y 6).

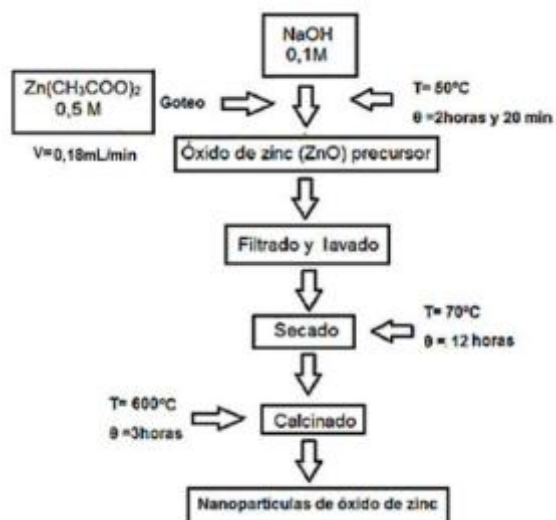
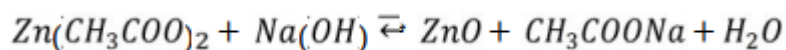


Figura 5. Diagrama de flujo del procedimiento sintético para las Nps-ZnO.



Figura 6. Síntesis de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO).

La caracterización morfológica de las nanopartículas de óxido de zinc se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) en la Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez para obtener imágenes de alta resolución que revelaron la estructura superficial y el tamaño de las partículas sintetizadas.

4.2.3. Evaluación de la durabilidad de la madera mediante microcosmos terrestre

La evaluación de la durabilidad natural de la madera se realizó según la pre norma europea 807 (European Committee for Standardization, 2001), para lo cual se utilizó la metodología de microcosmos terrestre; para ello, se emplearon 200 probetas de 10×5×100 mm en direcciones radial, tangencial y longitudinal, de albura. La elaboración de las probetas se llevó a cabo en la unidad de Componentes y Estructuras de Madera (COESMA) del Instituto Tecnológico de El Salto (Figura 7).



Figura 7. Elaboración de probetas para durabilidad de la madera.

Una vez dimensionadas, las probetas se marcaron a 2.24 cm en cada extremo y una marca justo en medio, esto para tener una referencia de apoyo al momento de realizar las pruebas de dureza. De manera similar, se realizó a los 2.0 cm para saber hasta donde tenían que ser enterradas en la tierra (Figura 8).



Figura 8. Marcado de probetas para durabilidad de la madera.

El suelo utilizado para el experimento se recolectó de un área forestal del instituto, asegurándose de que no hubiera sido perturbado previamente por cultivos o trabajos recientes. Una vez obtenida la tierra, se cribó con una malla de 4 mm para obtener partículas de tierra más pequeñas y así facilitar la introducción de las probetas. Para ello, previamente se realizó un ensayo de humedad al suelo para obtener el punto de saturación de humedad y determinar el valor adecuado de agua. El suelo preparado se colocó en un contenedor plástico que fue aislado con hule para evitar filtraciones (Figura 9).



Figura 9. Preparación del suelo para el ensayo de durabilidad de la madera.

Las 200 probetas se dividieron en cuatro tratamientos con 50 repeticiones cada uno. En el primer tratamiento de control no se usaron nanopartículas de óxido de zinc; en el segundo se utilizó una dosis de 0.5 g.L^{-1} ; en el tercero, 1 g.L^{-1} ; y en el cuarto, 5 g.L^{-1} de agua destilada como medio de impregnación la cual se realizó mediante aplicación de vacío con ciclos de 10 minutos para cada concentración de Nps-ZnO. Como tratamiento testigo se utilizaron 50 probetas de madera de *Fagus sylvatica* a las cuales no se les adicionaron las nanopartículas (Figura 10).



Figura 10. Preparación de las probetas con las dosis de Npz-ZnO.

Tras el proceso de impregnación, cada probeta fue pesada y medida en longitud, ancho y grosor. A continuación, se llevó a cabo una prueba de frecuencia. Para ello, se colocaron las probetas sobre dos soportes de silicona, situados a 22.4 mm de sus extremos dentro del dispositivo diseñado para estas pruebas. La frecuencia fue inducida mediante vibraciones generadas por un impacto en el punto medio de la probeta, registradas por un micrófono a través de ondas de frecuencia. La magnitud de dichas vibraciones fue determinada utilizando el software Vibration program® (Divos, 2004) (Figura 11).



Figura 11. Pruebas de frecuencia en las probetas de madera.

Después de medir las frecuencias, las probetas se secaron en una estufa a $100 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta alcanzar un peso constante. Se reservaron 10 probetas impregnadas con ZnO como referencia, y el resto se enterraron al 80% de su longitud en el suelo del contenedor, separadas por 20 mm, para iniciar el ensayo de durabilidad de la madera en tierra (Figura 12).



Figura 12. Secado e instalación de probetas en el microcosmos terrestre.

Una vez establecido el microcosmos, se estableció un monitoreo semanal para mantener la humedad del suelo entre el 80% y el 95% de su capacidad de retención de agua. El tiempo de exposición fue de 32 semanas, y cada 8 semanas se realizaron los monitoreos de pérdida de masa a las probetas y frecuencia.

4.2.3.1. Pérdida de masa

Para estimar la pérdida de masa de las probetas en el microcosmos terrestre, se usaron los pesos al inicio del ensayo y el final al término de este en condición seca utilizando la siguiente fórmula:

$$Pm = \left(\frac{Pi - Pf}{Pi} \right) * 100$$

Donde:

Pm = Pérdida de masa (%)

Pi = Peso seco al inicio del experimento (g)

Pf = Peso seco al final del experimento (g)

4.2.3.1. Clasificación de la durabilidad de la madera por pérdida de masa

La durabilidad natural de la madera se clasificó usando el índice "x" conforme a la Norma Europea EN 350-1 (EN, 1994) aplicando la fórmula siguiente:

$$x = \frac{\bar{y}_{sp}}{\bar{x}_f}$$

Donde

x = índice "x"

$\bar{y}_{sp}$ = Promedio de pérdida de masa de la especie de interés (g)

$\bar{x}_f$ = Promedio de pérdida de masa de la especie de control (g)

Los resultados obtenidos de la relación anterior se clasifican según la tabla 1:

Tabla 1. Clasificación de la durabilidad de la madera en función a la pérdida de masa.

Clase de durabilidad	Descripción	Pérdida de masa según "x"
1	Muy durable	$x < 0.15$
2	Durable	$0.15 > x \leq 0.30$
3	Moderadamente durable	$0.30 > x \leq 0.60$
4	Poco durable	$0.60 > x \leq 0.90$
5	No durable	$x > 0.90$

Fuente: EN (1994).

4.2.3.2. Pérdida del Módulo de elasticidad dinámico (MOEdin)

La pérdida del MOE_{din} es mucho más sensible que otras pruebas y presenta valores altamente significativos, incluso en etapas iniciales de deterioro cuando la pérdida de masa es aún baja (Carrillo-Parra et al., 2011). Para el cálculo de la pérdida del módulo de elasticidad dinámico se utilizó la siguiente fórmula:

$$MOE_{din} = \left(\frac{2 * f_n}{\gamma_n * \pi} \right)^2 * \left(\frac{mL^3}{I} \right)$$
$$I = \frac{b * a^3}{12}$$

Donde:

MOEdin = Módulo de elasticidad dinámico (MPa)

fn = Frecuencia (Hz)

$\gamma_n = (n+0.5)^2 = 2.267$

$\pi = 3.1416$

m = Peso de la probeta por encima del punto de saturación de la fibra (g)

L = Longitud de la probeta (mm)

I = Inercia (mm⁴)

a = Grosor de la probeta (mm)

b = Ancho de la probeta (mm)

4.2.3.3. Clasificación de la pérdida del (MOEdin) en madera

Aunque no existe un sistema para clasificar la pérdida del MOEdin y categorizar el grado de deterioro mecánico de la madera; en este trabajo se utilizó una clasificación técnica e interpretativa con una escala de severidad incipiente a severa con la finalidad de proporcionar un marco para evaluar la gravedad del daño con base en la pérdida de rigidez dinámica (Ross, 2015) (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de la degradación de la madera en función a la pérdida del MOEdin.

Clase de degradación	Pérdida de MOEdin (%)	Descripción	Implicaciones
Clase 1: Pérdida Incipiente	0 a <5	Madera en buen estado. Variación normal del contenido de humedad, grietas menores.	No hay un efecto significativo en la capacidad estructural.
Clase 2: Pérdida Leve a Moderada	5 a <15	Etapas iniciales de deterioro. Grietas/hendiduras moderadas, podredumbre incipiente, galerías de insectos aisladas.	El factor de seguridad se reduce, pero es probable que el elemento aún sea adecuado para su servicio.
Clase 3: Pérdida Significativa	15 a <30	Deterioro avanzado. Podredumbre activa, crecimiento fúngico, daño significativo por insectos, grietas grandes, deformación plástica por sobrecarga.	La rigidez está sustancialmente comprometida. Es posible que el elemento ya no cumpla con su especificación de diseño original.
Clase 4: Pérdida Severa/Falla Crítica Inminente	≥30	Madera severamente comprometida, ha perdido la mayor parte de su integridad estructural. Podredumbre avanzada, daño extenso, fracturas críticas.	Se considera que el elemento ha fallado o está al borde de la falla. No soporta ninguna carga significativa.

4.2.4. Nivel de protección contra la retención de radiación UV

Para realizar las pruebas de retención de luz UV se utilizó la norma europea N 927-3 parte tres: envejecimiento natural (UNE, 2000). La selección de las probetas se realizó asegurando que los anillos de crecimiento no superaran una inclinación de 70 grados. Las muestras de madera seleccionadas fueron trasladadas a la unidad de Tecnología de la Madera del Instituto Tecnológico de El Salto, donde se acondicionaron a un contenido de humedad entre el 10% y el 12% durante 600 horas. Posteriormente, se utilizaron equipos de corte industrial para elaborar las probetas definitivas.

Se utilizaron 42 probetas de madera de pino estructural con dimensiones de 375×78×20 mm en largo, ancho y grosor. Estas probetas se dividieron en cinco tratamientos o concentraciones de nanopartículas de ZnO, cada uno con siete

repeticiones de las cuales una se reservó como referencia hasta el final de la exposición. Para el recubrimiento se utilizó barniz comercial transparente como emulsificante de las nanopartículas de ZnO. Los tratamientos de aplicación evaluados fueron: 1) dosis con 0 g.L⁻¹ de ZnO; 2) dosis con 0.5 g.L⁻¹ de ZnO; 3) dosis con 1.0 g.L⁻¹ de ZnO; 4) dosis con 5.0 g.L⁻¹ de ZnO; y 5) dosis con 10 g.L⁻¹ de ZnO.

Una vez formuladas las dosis de nanopartículas con el barniz, la aplicación del recubrimiento fue de 150 g.m², de tal forma que la superficie de cada probeta requirió de 5.17 g de barniz para cubrir un área de 0.345 m² que correspondió a la superficie de cada probeta en una sección de 300x11.5 mm dejando 50 y 25 mm en los extremos de la probeta que se sellaron con esmalte anticorrosivo color blanco para evitar origen de defectos durante la exposición. Las probetas se dejaron secar y acondicionar durante 28 días a 20°C y 65% de humedad relativa (Figura 13).

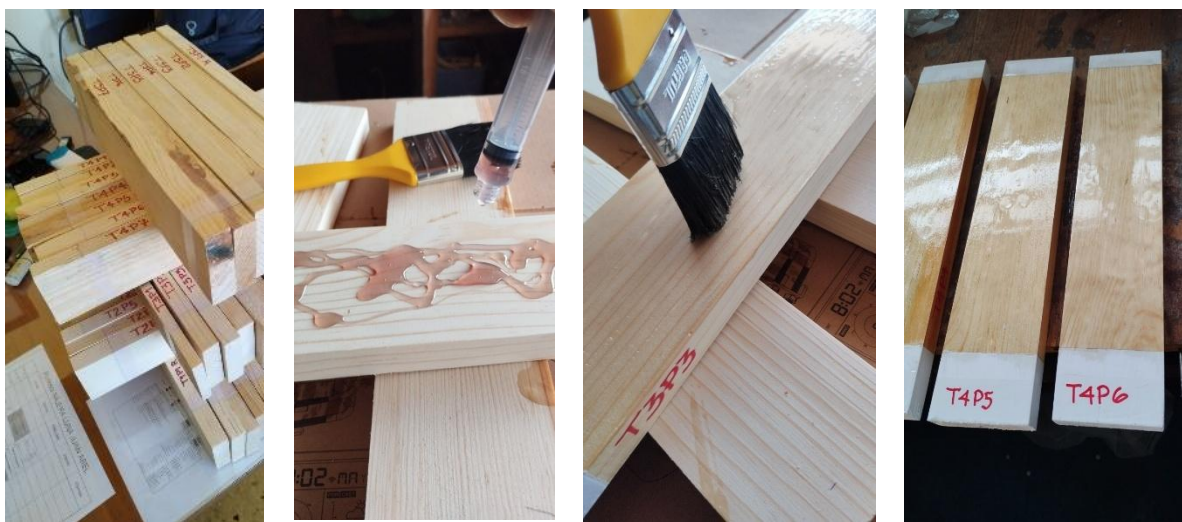


Figura 13. Preparación de probetas para el ensayo contra la retención de radiación UV.

Cuando las probetas se acondicionaron con respecto a las condiciones estipuladas en las normas, se obtuvieron los valores de color y brillo de cada probeta utilizando un colorímetro modelo LS171, que detecta la diferencia de color entre la muestra y el estándar después de ajustar el umbral de diferencia de color Δ . Para medir el brillo, se utilizó un brillómetro YG60S con una inclinación de espejo a 60 grados. La medición del brillo se realizó con seis lecturas distribuidas uniformemente en toda superficie meteorizada de cada probeta, mientras que para el color se tomó una sola lectura del

centro de cada probeta. Cabe mencionar que las lecturas mensuales se realizaron en los mismos puntos señalados en las probetas para evitar desviaciones en las lecturas tanto del color como del brillo (Figura 14).



Figura 14. Toma de información de color y brillo de las probetas.

Una vez que se tomaron las lecturas de brillo y color, las seis probetas restantes se colocaron en un expositor exterior de estructura metálica con 45° de inclinación orientadas al norte magnético para garantizar la mayor exposición solar durante el periodo de evaluación de un año, donde cada mes se tomaron las lecturas de brillo y color hasta el fin del ensayo (Figura 15).



Figura 15. Exposición de las probetas a la radiación UV.

4.2.4.1. Cambio de brillo

El cambio de brillo de cada probeta se obtuvo midiendo el brillo antes y después de la exposición a la radiación natural de rayos ultravioleta para tener dos momentos distintos y conocer la diferencia mediante la siguiente relación:

$$\Delta GU = UB_i - UB_f$$

Donde:

ΔGU = Cambio de brillo (unidades de brillo).

UB_i = Brillo inicial de la probeta (unidades de brillo).

UB_f = Brillo final de la probeta (unidades de brillo).

4.2.4.2. Clasificación del cambio de brillo

Para fines ilustrativos de este trabajo, la clasificación del cambio de brillo se adaptó de la norma ASTM D523-14 (ASTM International, 2014), la cual establece mediciones en unidades de brillo bajo ángulos de incidencia estándar (20°, 60° u 85°) (Tabla 3).

Tabla 3. Clasificación del cambio de brillo.

Categoría	Cambio de brillo (ΔGU)	Descripción cualitativa
Muy baja	0 – <10	Superficie conserva su brillo original; mínima fotodegradación.
Baja	10 – <25	Ligera pérdida perceptible; buena protección superficial.
Moderada	25 – <50	Disminución evidente del brillo; exposición media o degradación parcial.
Alta	50 – <75	Brillo reducido significativamente; degradación avanzada de la superficie.
Muy alta	> 75	Superficie opaca; daño severo por radiación y erosión superficial.

4.2.4.3. Cambio de color

Para medir las diferencias de color entre los periodos de exposición de las probetas, se utilizó el parámetro ΔE^* desarrollado por Keey (2005). Este método compara las lecturas del sistema CIE Lab en dos momentos distintos, calculando la suma de las diferencias cuadráticas de las coordenadas L, a y b. En este sistema, L^* representa la luminosidad, con valores entre 0 (negro) y 100 (blanco). Las coordenadas a^* y b^*

indican los tonos cromáticos: +a* y -a* para rojo y verde, y +b* y -b* para amarillo y azul. La relación utilizada se muestra a continuación:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Donde:

ΔE^* = Diferencia total de color

(ΔL^* , Δa^* y Δb^*) = Valores de coordenada de diferencia de color.

4.2.4.4. Clasificación del cambio de color

El cambio de color se clasificó en función del cambio total de color (ΔE^*) que se basa en criterios perceptuales definidos por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) y por lo recomendado por Cui et al. (2002), quienes identificaron cinco niveles de percepción del cambio de color por el ojo humano: (I) ΔE^* de 0 a 1.5 no es apreciable, (II) ΔE^* de 1.5 a 3 es apenas apreciable, (III) ΔE^* de 3 a 6 es apreciable, (IV) ΔE^* de 6 a 12 es muy notable, y (V) ΔE^* mayor a 12 es un cambio total. Este criterio se usó como referencia en este trabajo (Tabla 4).

Tabla 4. Clasificación del cambio de color.

Categoría	Cambio de color (ΔE^*)	Clasificación
Muy baja	0 a ≤ 1.5	Cambio imperceptible al ojo humano.
Baja	1.5 a < 3.0	Cambio perceptible solo bajo observación cercana.
Moderada	3.0 a < 6.0	Cambio claramente visible; leve alteración del tono.
Alta	6.0 a < 12.0	Cambio notable; pérdida significativa del color original.
Muy alta	> 12.0	Cambio extremo o decoloración severa; superficie grisácea o blanquecina.

4.3. Procesamiento de información

Para analizar el efecto de la pérdida de masa y el envejecimiento de la madera tratada con las cuatro concentraciones de nanopartículas de óxido de zinc, se realizaron pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilks modificado que indicaron cuando las variables de interés provienen o no de una población con distribución normal ($p < 0.001$). En el caso de seguir una distribución normal, para

identificar diferencias estadísticas significativas en los tratamientos evaluados se utilizó estadística paramétrica mediante análisis de varianza y pruebas de comparación de medias de Tukey; cuando las variable de interés no mostraron una distribución normal, para identificar diferencias significativas entre los tratamientos evaluados se utilizó estadística no paramétrica mediante pruebas de la mediana de Kruskal-Wallis con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$ y una confiabilidad del 95%. El análisis estadístico se realizó utilizando el programa INFOSTAT versión 2020 (Di Rienzo et al., 2020).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Caracterización de nanopartículas de ZnO

El análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectro de difracción de electrones (EDS) reveló que las nanopartículas de ZnO son semi esféricas, ligeramente aglomeradas y miden entre 50 y 100 nm, lo que las ubica dentro del rango ideal para aplicaciones antimicrobianas (Figura 16 A). Además, confirmó que las partículas están constituidas exclusivamente por los elementos esperados (zinc y oxígeno) sin presencia de contaminantes ni trazas de otros materiales que podrían alterar la estabilidad química y la eficacia biocida del material (Irede et al., 2024). Esta pureza es fundamental para garantizar la reproducibilidad de los ensayos biológicos y la eficacia del tratamiento en aplicaciones de protección de madera (Figura 16 B). En varias regiones del campo visual se detecta una ligera aglomeración, lo cual podría atribuirse a factores externos durante el proceso de síntesis, tales como la velocidad de agitación, la temperatura de reacción o la concentración de precursores. Estas aglomeraciones no necesariamente comprometen la funcionalidad de las nanopartículas, pero pueden influir en su distribución y penetración al momento de aplicarlas sobre la madera.

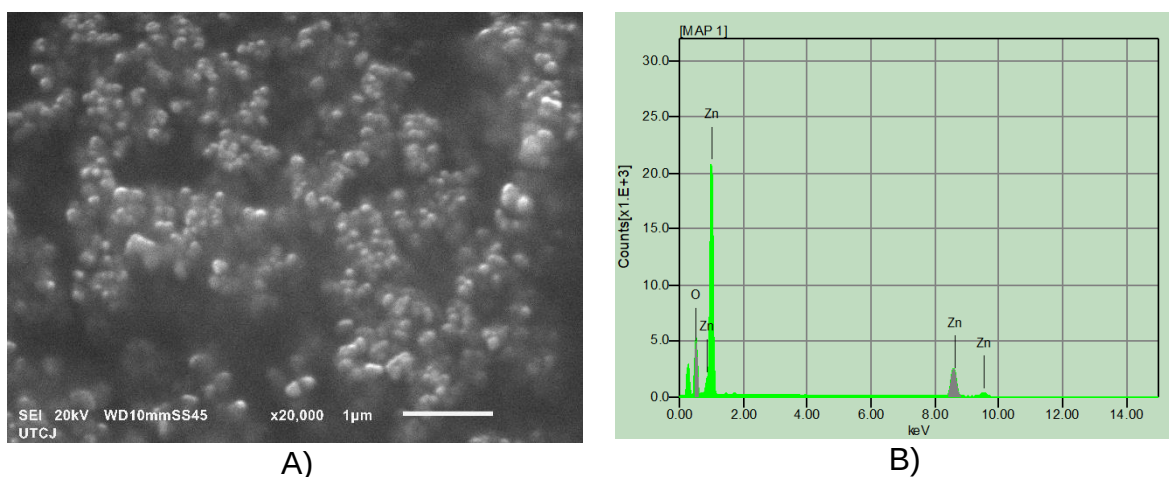


Figura 16. A) análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) y B) espectro de difracción de electrones (EDS) de las nanopartículas de ZnO.

La espectrofotometría UV-Visible mostró una banda de absorción bien definida con la radiación electromagnética en el rango de longitud de onda ultravioleta-visible entre 330 y 350 nm, lo cual concuerda con los valores reportados en la literatura para nanopartículas de ZnO con tamaños aproximados a 100 nm. Este pico de absorción es característico de la transición electrónica entre la banda de valencia y la banda de conducción del óxido de zinc, y su posición puede variar ligeramente dependiendo del método de síntesis, la morfología y el grado de pureza de las partículas (Figura 17).



Figura 17. Pico de absorción de las nanopartículas.

Esta morfología es consistente con lo reportado en la literatura para ZnO sintetizado por métodos de precipitación o sol-gel, donde las partículas tienden a formar estructuras cuasi-esféricas debido a la naturaleza isotrópica de su crecimiento cristalino (Moghri-Moazzen et al., 2013). La ligera aglomeración observada es un fenómeno común en nanopartículas inorgánicas, ocasionado por las fuerzas de Van der Waals y la alta energía superficial que promueven la coalescencia de las partículas (Khan et al., 2024). Si bien dicha aglomeración puede reducir la superficie efectiva disponible para interacciones antimicrobianas, no impide su aplicación práctica en tratamientos para madera, siempre que se mantenga una adecuada dispersión en el medio de impregnación (Azizi et al., 2013).

El rango de tamaño obtenido (50 -100 nm) se considera apropiado para el uso de ZnO en la protección de madera, ya que ofrece un equilibrio entre reactividad superficial y estabilidad coloidal. Las nanopartículas de este rango exhiben una alta relación superficie/volumen, lo que favorece la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y la liberación controlada de iones Zn^{2+} , mecanismos principales de su acción biocida frente a hongos e insectos xilófagos (Zhou et al., 2023). Además, su tamaño permite una adecuada penetración en la estructura porosa de la madera, especialmente en los lúmenes y paredes celulares, sin comprometer las propiedades estructurales del sustrato (Papadopoulos y Taghiyari, 2019). Sin embargo, la presencia de agregados puede limitar la uniformidad de la distribución dentro del material, por lo que se recomienda optimizar la formulación mediante ultrasonido o el uso de agentes dispersantes (Faure et al., 2013) y evaluar la estabilidad y comportamiento ambiental de las nanopartículas en sistemas lignocelulósicos, ya que factores como el pH, la exposición a la radiación solar y la humedad pueden influir en su transformación o movilidad (Clausen et al., 2010).

En conjunto, los resultados de la caracterización sugieren que las nanopartículas de ZnO analizadas presentan las propiedades morfológicas y químicas óptimas para su aplicación en tratamientos protectores de madera, proporcionando una alternativa eficaz, sostenible y menos tóxica que los preservantes convencionales.

5.2. Pérdida de masa

5.2.1. Comportamiento general de la pérdida de masa

La dosis de 0.5 g.L^{-1} mostró el mejor desempeño durante 32 semanas de exposición, con solo 2.49% de pérdida de masa; sin embargo, es interesante notar que todas las concentraciones de ZnO nanoparticulado demostraron efectividad en reducir la degradación con valores cercanos al 3% (Figura 18).

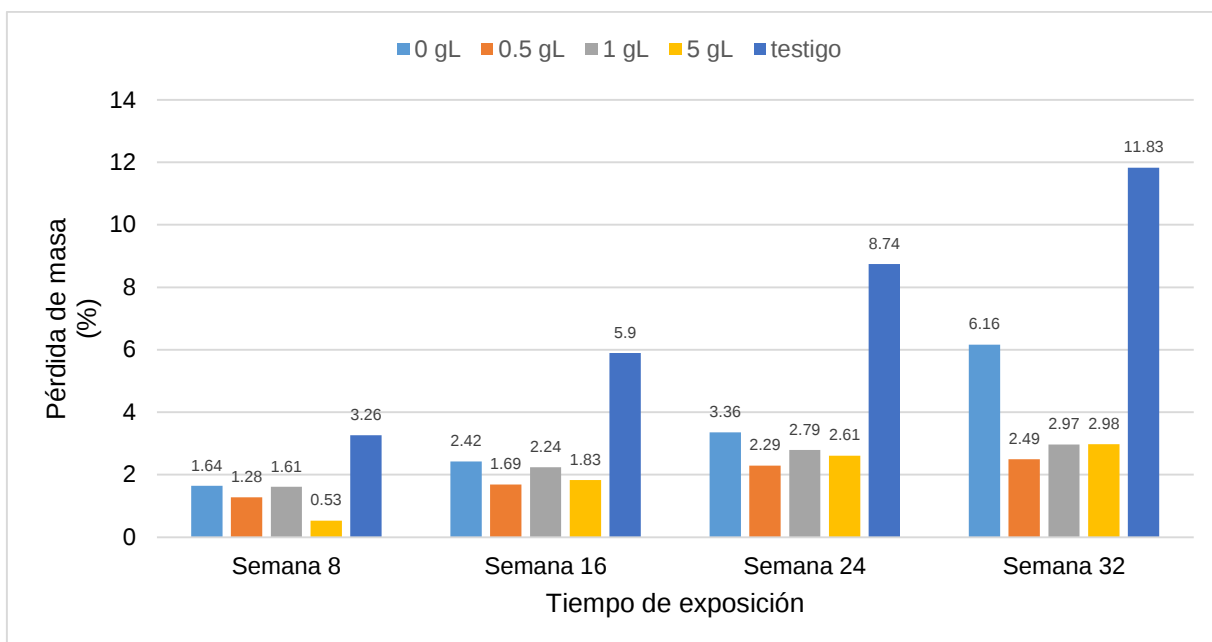


Figura 18. Pérdida de masa por dosis de aplicación durante las 32 semanas de exposición.

Esto sugiere que las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) ejercen un efecto protector significativo contra la degradación de la madera de pino, en contraste con la pérdida de masa del testigo quien mostró la mayor pérdida de masa en todas las evaluaciones, alcanzando un 11.83% al final de la evaluación. Este comportamiento era esperado, ya que la madera de *Fagus sylvatica* que se utilizó como testigo se caracteriza por una mayor susceptibilidad a la colonización microbiana en condiciones húmedas y con actividad fúngica especialmente frente a hongos xilófagos y procesos de lixiviación en ambientes terrestres simulados (Langer y Bußkamp, 2021).

Mientras que el tratamiento sin nanopartículas (0 g.L⁻¹) mostró la pérdida de masa más alta con una pérdida final de masa del 6.16 %, lo que confirma que la madera de pino, aunque naturalmente más resistente que *Fagus sylvatica*, requiere protección adicional para mantener su estabilidad en ambientes terrestres. Por otro lado, la dosis más alta (5 g.L⁻¹) no proporcionó una mejora significativa respecto a la concentración de 1 gr. l⁻¹ lo cual podría deberse a la aglomeración de nanopartículas y la disminución de su efecto activo (Clausen et al., 2010).

La eficacia del ZnO se atribuye principalmente a sus propiedades antifúngicas y antimicrobianas, así como a su capacidad de formar una capa protectora en la superficie y en los poros de la madera, limitando la colonización microbiana (Uyup et al., 2019). Además, las nanopartículas presentan una elevada relación superficie/volumen, lo que aumenta su interacción con los agentes degradadores y mejora la persistencia del tratamiento (Zhou et al., 2023).

El hecho de que incluso la dosis más baja (0.5 g.L^{-1}) mostrara protección significativa sugiere que el mecanismo de acción no depende exclusivamente de la concentración, sino también de la distribución y adhesión de las nanopartículas en la matriz de la madera. En ese sentido, la progresión de la pérdida de masa sigue un patrón exponencial en el testigo, mientras que en las muestras tratadas la degradación es más lineal y controlada. Entre las semanas 24 y 32, se observa un incremento notable en la tasa de degradación del testigo (de 8.74% a 11.83%), mientras que las muestras tratadas mantienen tasas de degradación más constantes.

Esto sugiere que las nanopartículas no solo retrasan el inicio de la degradación, sino que también moderan la velocidad del proceso una vez iniciado, posiblemente mediante la inhibición continua de los microorganismos degradadores que, desde una perspectiva práctica, los resultados indican que dosis moderadas de nanopartículas (0.5 a 1 g.L^{-1}) pueden ofrecer protección comparable o superior a dosis más altas a largo plazo. Esto tiene implicaciones importantes para la economía del tratamiento, ya que reduce los costos de materiales y potencialmente minimiza impactos ambientales.

5.2.2. Pérdida de masa por tratamiento

El análisis de varianza para la pérdida de masa evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$), donde las dosis con 0.5 y 1 g.L^{-1} de ZnO conformaron el grupo A, sin diferencias significativas entre ellos; el tratamiento con 5 g.L^{-1} se ubicó en el grupo B; el tratamiento sin ZnO en el C, y el testigo en el D. Esta distribución indica que la incorporación de nanopartículas de ZnO contribuyó de manera significativa a reducir la pérdida de masa frente a la madera sin tratamiento,

siendo los valores más bajos de degradación utilizando las dosis más bajas (0.5 y 1 g.L⁻¹) en los tratamientos de la madera (Tabla 5).

Tabla 5. Análisis de varianza no paramétrica para la pérdida masa por dosis de aplicación de nanopartículas de ZnO.

Dosis de aplicación (g.L ⁻¹)	n	Media (%)	Medianas (%)	Promedio de rangos*	GL	H	p
0.5	40	2.49	2.25	53.64 a	4	103.30	<0.0001
1		2.97	2.5	71.48 ab			
5		2.98	2.85	82.46 b			
0		6.16	5.42	126.53 c			
testigo		11.83	11.12	168.40 d			

*Rangos con la misma letra en común no son significativamente diferente, Kruskal Wallis $\alpha=0.05$. **Significativo al 5%. GL = Grados de libertad, H = valor estadístico de la prueba Kruskal Wallis.

El efecto protector puede estar asociado a la acción física de las nanopartículas dentro de la estructura porosa de la madera, donde la impregnación de ZnO en las paredes celulares o en los lúmenes puede disminuir la permeabilidad, limitando la absorción de agua y, por consiguiente, reduciendo las condiciones favorables para el crecimiento fúngico (Clausen et al., 2010).

El hecho de que los tratamientos de 0.5 y 1 g.L⁻¹ no presenten diferencias significativas sugiere que dosis relativamente bajas de ZnO son suficientes para alcanzar una protección efectiva. Esto coincide con lo reportado por Harandi et al. (2016), quienes observaron que concentraciones moderadas de ZnO (por debajo del 2 g.L⁻¹) producen un efecto antifúngico notable, mientras que concentraciones mayores tienden a generar una respuesta de meseta al saturar el espacio de la madera y reducir su área efectiva. En este estudio, la dosis del 5 g.L⁻¹ (grupo B) mostró una pérdida de masa ligeramente superior, lo que podría deberse a una dispersión menos eficiente o a un bloqueo parcial de la penetración del ZnO en el sustrato lignocelulósico.

Por otro lado, el tratamiento sin nanopartículas (0 g.L⁻¹) y el testigo (madera sin ningún tratamiento) mostraron las mayores pérdidas de masa, ubicándose en los grupos C y D respectivamente. Esto confirma que la madera sin protección química es altamente susceptible a la degradación biológica, y subraya la eficacia del ZnO como agente protector.

Desde un punto de vista tecnológico, estos resultados sugieren que las nanopartículas de ZnO constituyen una alternativa sustentable a los preservantes tradicionales basados en sales de cobre, arsénico o cromo, los cuales presentan problemas de toxicidad ambiental. El ZnO es un compuesto con menor impacto ecológico (Dey et al., 2025), y su uso en forma nanométrica permite mejorar la eficiencia biocida con menores dosis (Sirelkhatim et al., 2015). Además, la estabilidad química del ZnO y su baja solubilidad en agua favorecen una mayor resistencia al lixiviado, lo que aumenta la durabilidad del tratamiento en condiciones de humedad (Clausen et al., 2010).

No obstante, aunque los resultados de laboratorio son prometedores, diversos autores señalan la necesidad de evaluar la retención, distribución y lixiviación del ZnO en condiciones reales de exposición (de Francisco et al., 2024). La eficacia a largo plazo dependerá no solo de la dosis aplicada, sino también de la formulación, el método de impregnación y la compatibilidad del ZnO con la matriz lignocelulósica (Sommerauer et al., 2023).

5.2.3. Clasificación de la durabilidad de la madera tratada

De acuerdo con los valores del índice “x”, las muestras tratadas con dosis de 0.5, 1.0 y 5.0 g.L⁻¹ presentaron valores entre 0.21 y 0.25, clasificándose como durables, mientras que la madera sin tratamiento (0 g.L⁻¹) obtuvo un índice de 0.5, correspondiente a la categoría de moderadamente durable (Tabla 6).

Tabla 6. Índice de clasificación de la durabilidad de la madera.

Dosis de aplicación (g.L ⁻¹)	Índice “x”	Clasificación
0	0.52	Moderadamente durable
0.5	0.21	Durable
1	0.25	Durable
5.0	0.25	Durable

El aumento en la durabilidad puede explicarse por las propiedades biocidas y antimicrobianas inherentes al ZnO en su forma nanométrica ya que las nanopartículas de óxido de zinc son conocidas por generar especies reactivas de oxígeno (ROS)

como el peróxido de hidrógeno y el ion superóxido, las cuales dañan las membranas celulares de microorganismos y desnaturalizan proteínas esenciales, inhibiendo el crecimiento de hongos de pudrición (Sirelkhatim et al., 2015; Babayevska et al., 2022). En el contexto de la madera, esta acción impide la colonización fúngica que normalmente conduce a la pérdida de masa, disminución de la lignina y degradación de la celulosa, procesos directamente asociados con la pérdida de durabilidad (Zabel y Morrell, 2020).

La madera sin nanopartículas (0 g.L^{-1}) mostró una clasificación moderadamente durable, reflejando su vulnerabilidad natural frente al deterioro biológico, por lo que el pino, al ser una madera blanda con bajo contenido de extractivos fenólicos, presenta una durabilidad natural limitada frente a hongos xilófagos, especialmente bajo condiciones de humedad (Kirker et al., 2013).

5.2.4. Pérdida del MOE_{din}

Durante el tiempo de exposición de 32 semanas, la tendencia general mostró un incremento en la pérdida del MOE_{din}; sin embargo, las maderas tratadas con nanopartículas presentaron menores pérdidas relativas del MOE_{din} respecto al testigo y al control sin nanopartículas. A las 32 semanas, la madera tratada con una dosis de 0.5 g.L^{-1} presentó una pérdida de 14.33%, mientras que el testigo registró 24.52% y el tratamiento sin nanopartículas hasta 26.71%. Esto indica una mejor estabilidad mecánica en las maderas tratadas, especialmente con concentraciones intermedias de ZnO, donde el equilibrio entre dispersión y penetración de nanopartículas seguramente favoreció la protección sin afectar la microestructura de la celulosa (Clausen et al., 2010; Paul et al., 2025) (Figura 19).

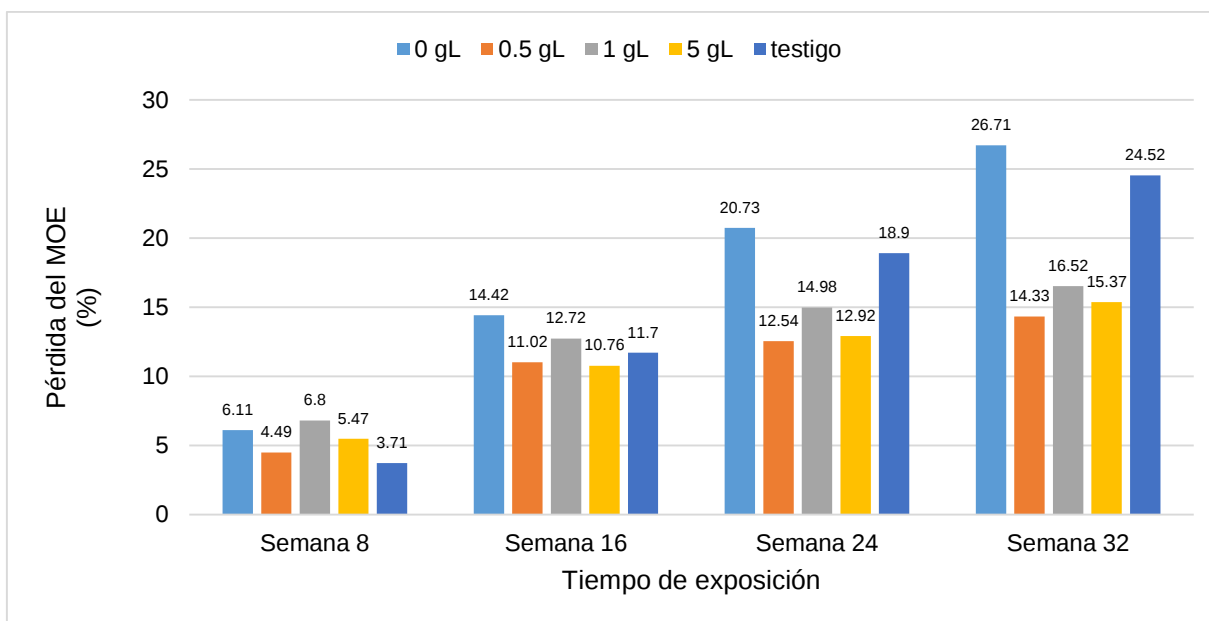


Figura 19. Pérdida del Módulo de elasticidad (MOE) por dosis de aplicación durante las 32 semanas de exposición.

5.2.5. Pérdida del MOE din por tratamiento

El análisis de varianza de la pérdida del MOE din evidenció diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$). De acuerdo con el análisis de rangos de la mediana, los tratamientos con 0.5, 1 y 5 g.L⁻¹ de ZnO conformaron el grupo A, mientras que el tratamiento sin nanopartículas (0 g.L⁻¹) y el testigo (madera sin ningún tratamiento) se agruparon en el grupo B (Tabla 7).

Tabla 7. Análisis de varianza no paramétrico para la pérdida del MOE dinámico por dosis de aplicación de nanopartículas de ZnO.

Dosis de aplicación (g.L ⁻¹)	n	Media (%)	Medianas (%)	Promedio rangos*	GL	H	P
0.5	40	14.33	13.78	61.70 a	4	81.57	<0.0001
5.0		15.37	14.85	71.80 a			
1		16.52	16.05	79.10 a			
testigo		24.52	24.82	138.15 b			
0		26.71	26.79	151.75 b			

*Rangos con la misma letra en común no son significativamente diferente, Kruskal Wallis $\alpha=0.05$.

**Significativo al 5%. GL = Grados de libertad, H = valor estadístico de la prueba Kruskal Wallis.

Los tratamientos con ZnO en dosis de 0.5, 1 y 5 g.L⁻¹ no mostraron diferencias significativas entre sí, lo que indica que incluso a bajas concentraciones, las nanopartículas son capaces de ejercer un efecto protector eficaz. Esto concuerda con lo reportado por Cui et al. (2002), quienes observaron que dosis reducidas de ZnO proporcionan mejoras en la durabilidad y MOE de la madera.

Por otro lado, los tratamientos sin ZnO y el testigo presentaron las mayores pérdidas en el módulo de elasticidad, ubicándose en el grupo B. Esto evidencia que la ausencia de nanopartículas protectoras permite el deterioro del material, ya sea por acción de agentes biológicos o por cambios físicos y químicos asociados a la humedad y la oxidación. De acuerdo con Yang et al. (2017), la madera sin tratamiento es susceptible a la colonización de hongos de pudrición parda, que degradan selectivamente las hemicelulosas y la celulosa, afectando directamente la rigidez y resistencia del material. En cambio, el ZnO ejerce una función protectora que limita la degradación enzimática de la pared celular (Alsalamah et al., 2025).

5.2.6. Clasificación de la pérdida del MOEdin

A las 32 semanas, ninguna de las maderas tratadas superó el umbral del 20% de pérdida del MOEdin, mientras que el testigo y el control sí lo hicieron. El tratamiento con la dosis de 0.5 g.L⁻¹ de ZnO presentó la menor pérdida acumulada del MOE, con valores que se mantuvieron entre 4.49% y 14.33% durante la duración del ensayo con una clasificación final de “moderada”, lo que indica un efecto estabilizador del ZnO sobre la estructura lignocelulósica, probablemente asociado con su acción antifúngica y antioxidante, que limita la degradación de los componentes de la pared celular (celulosa y lignina) (Farahani y Banikarim, 2013). Este comportamiento sugiere que bajas concentraciones son suficientes para retrasar el deterioro mecánico, aunque no lo eliminan por completo (Tabla 8).

Tabla 8. Clasificación de la durabilidad de la madera en función a la pérdida de masa.

Tratamiento	8 semanas	16 semanas	24 semanas	32 semanas	Clasificación final
0 g.L ⁻¹	Moderada (6.11)	Moderada (14.42)	Significativa (20.73)	Significativa (26.71)	Significativa
0.5 g.L ⁻¹	Baja (4.49)	Moderada (11.02)	Moderada (12.54)	Moderada (14.33)	Moderada
1 g.L ⁻¹	Moderada (6.80)	Moderada (12.72)	Moderada (14.98)	Significativa (16.52)	Significativa
5 g.L ⁻¹	Moderada (5.47)	Moderada (10.76)	Moderada (12.92)	Significativa (15.37)	Significativa
Testigo	Baja (3.71)	Moderada (11.70)	Significativa (18.90)	Significativa (24.52)	Significativa

Estudios comparativos han demostrado que la reducción del MOE din puede anticipar la pérdida de masa, ya que los cambios estructurales en la celulosa y hemicelulosa afectan la rigidez antes de que se produzca una pérdida visible de material (Winandy y Morrell, 1993; Curling et al., 2002). En ataques de hongos de pudrición parda, por ejemplo, la pérdida de 10% de MOE puede presentarse con apenas 2% de pérdida de masa; en contraste, los hongos de pudrición blanca degradan lignina de forma más gradual, generando una pérdida de masa significativa antes de una reducción drástica del MOE. Por tanto, el análisis conjunto de ambos parámetros (masa y MOE) permite identificar el tipo de deterioro y su etapa evolutiva (Brischke y Rapp, 2008).

Desde el punto de vista estructural, la presencia de nanopartículas dentro de la matriz leñosa podría contribuir a la mejora o estabilización del MOE mediante mecanismos físicos adicionales. Estudios recientes han demostrado que las nanopartículas de óxidos metálicos, como ZnO o TiO₂, pueden reforzar la microestructura de la madera al depositarse en las cavidades celulares o sobre las fibrillas de celulosa, generando una especie de recubrimiento inorgánico que reduce la absorción de agua y aumenta la rigidez (Harandi et al., 2016). Esta interacción entre el ZnO y los componentes lignocelulósicos también puede modificar las propiedades higroscópicas, reduciendo la variabilidad dimensional del material frente a cambios ambientales, lo cual contribuye a la estabilidad mecánica observada.

5.3. Exposición a la radiación UV

5.3.1. Cambio de brillo

Los resultados del cambio de brillo mostraron que la concentración de nanopartículas de ZnO influye en el cambio de brillo superficial de la madera tratada. En la Figura 20, se observan patrones distintivos de alteración del brillo en función de la dosis aplicada, donde el control ($0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) mostró los menores cambios en el brillo superficial, lo que confirma que las alteraciones observadas en las muestras tratadas son atribuibles específicamente a la presencia de ZnO. Este hallazgo coincide con lo reportado por Kúdela et al. (2024), quienes observaron que la madera no tratada mantiene una relativa estabilidad óptica bajo condiciones de envejecimiento moderado.

En las concentraciones bajas de ZnO (0.5 y $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), se registró un cambio gradual en el brillo que aumentó progresivamente con el tiempo de exposición, este comportamiento sugiere una degradación superficial lenta pero constante, posiblemente relacionada con la fotocátalisis inducida por el ZnO bajo radiación UV (Lenka y Badamali, 2023).

Las concentraciones más altas de ZnO (5 y $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) produjeron alteraciones más significativas en el brillo desde los primeros meses de exposición. Este efecto de dosis altas puede explicarse por el mayor cubrimiento superficial y la formación de una capa más densa de nanopartículas, que modifica las propiedades de reflexión de la luz y acelera los procesos de degradación fotoquímica (Jirouš-Rajković y Miklečić, 2021).

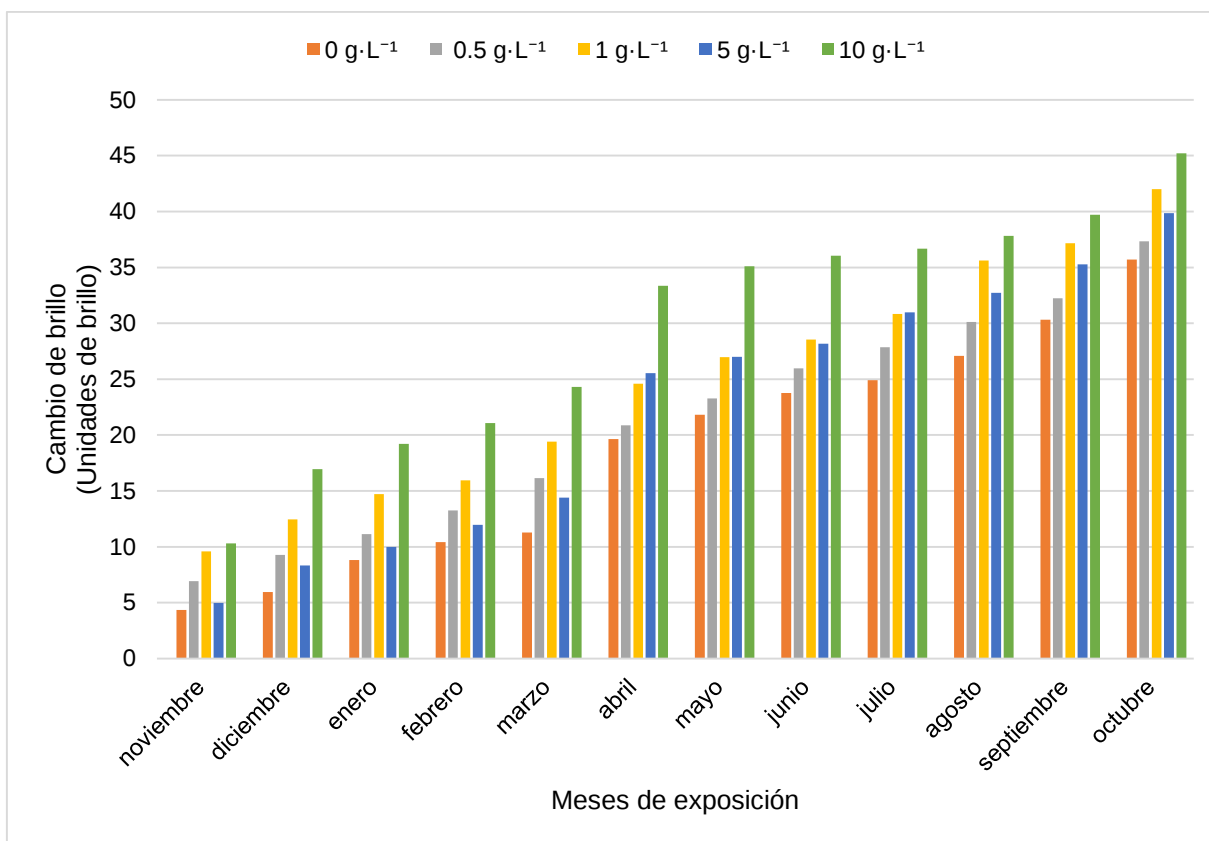


Figura 20. Cambio de brillo por dosis de aplicación durante 12 meses de exposición.

5.3.1. Cambio de brillo por tratamiento

El análisis de varianza para el cambio de brillo mostró diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.0047$), mostrando una tendencia ascendente de cambio de brillo conforme aumenta la concentración de ZnO (Tabla 9). Este comportamiento puede atribuirse a las propiedades fotocatalíticas y reflectivas del ZnO, que incrementan la capacidad de reflexión de la superficie al interactuar con la radiación solar (Papadopoulos y Taghiyari, 2019).

Tabla 9. Análisis de varianza para el cambio de brillo en la madera tratada con ZnO.

Fuente de variación	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	341.39	4.00	85.35	4.90	0.0047
Tratamiento	341.39	4.00	85.35	4.90	0.0047
Error	435.82	25.00	17.43		
Total	777.21	29.00			

SC = Suma de cuadrados; gl = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = estadístico de Fisher; p-valor = nivel de significancia.

Los valores promedio de cambio de brillo variaron entre 35.69 y 45.22 unidades de brillo (UB) y de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$), se identificaron dos grupos estadísticamente distintos donde el primero incluyó los tratamientos 0, 0.5, 1 y 5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, sin diferencias significativas entre ellos; mientras que el segundo grupo representado por el tratamiento 5, 1 y 10 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, mostró un incremento significativo de cambio de brillo en comparación con los tratamientos de menor concentración (Tabla 10).

Tabla 10. Comparación de medias para el cambio de brillo en la madera tratada con ZnO.

Dosis de aplicación ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	n	Media* (UB)	E.E
0	6	35.69 a	1.59
0.5		37.34 a	1.59
5		39.86 ab	1.59
1		42.01 ab	1.59
10		45.22 b	1.59

*Letras iguales indican que las medias no son significativamente diferentes entre sí (Tukey $p > 0.05$).

Los resultados revelan entre el grupo de control (0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) y las concentraciones de 0.5 a 5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, que las dosis moderadas de ZnO no alteran el brillo de la madera de manera crítica, seguramente porque las bajas concentraciones de las nanopartículas se ubican predominantemente en los lúmenes de las células o poros de la madera, sin formar una capa superficial continua que modifique sustancialmente la reflexión de la luz (Sommerauer et al., 2023).

En cuanto al incremento del cambio de brillo en la dosis de 10 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, puede atribuirse a la formación de una película o capa continua de nanopartículas en la superficie de la madera que aumenta la reflectividad especular y la actividad fotocatalítica del ZnO, que, en concentraciones suficientes, puede degradar selectivamente componentes amorfos de la madera como la lignina, dejando una superficie más rica en celulosa que tiende a ser menos reflectante (Jnido et al., 2021).

El comportamiento de la concentración media de 5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ y la de 1 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, es particularmente interesante y puede explicarse por la aglomeración de nanopartículas a concentraciones intermedias, lo que reduce su eficiencia para cubrir la superficie de manera uniforme y homogénea, pero en concentraciones altas (10 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), se supera un umbral crítico de cobertura que genera un cambio óptico significativo en el brillo.

5.3.2. Clasificación del cambio de brillo

De acuerdo con la clasificación de cambio de brillo, todos los tratamientos se clasifican como “moderado” (Tabla 11).

Tabla 11. Comparación de medias para el cambio de color en la madera tratada por dosis de aplicación.

Dosis de aplicación (g.L ⁻¹)	Cambio de brillo (ΔGU)	Categoría	Descripción cualitativa
0	35.69	Moderada	Disminución evidente del brillo; exposición media o degradación parcial.
0.5	37.34		
5	39.86		
1	42.01		
10	45.22		

5.3.3. Cambio de color

La evolución del cambio total de color (ΔE^*) mostró una tendencia ascendente en todos los tratamientos a medida del incremento del tiempo de exposición, lo que refleja la fotodegradación progresiva de los componentes cromofóricos de la madera por acción de la radiación solar y los factores climáticos (Pandey, 2005). En todos los tratamientos se observó un incremento progresivo del cambio de color a lo largo del tiempo, evidenciando el efecto acumulativo de los agentes climáticos (principalmente la radiación ultravioleta (UV), la humedad y las variaciones térmicas) sobre la superficie de la madera. El aumento más pronunciado se observó a partir del cuarto mes (marzo-abril), coincidiendo con el incremento de la radiación solar incidente, lo que favorece la fotodegradación de la lignina y la oxidación de extractivos.

Durante los primeros meses (noviembre a febrero), las diferencias entre tratamientos fueron leves, lo que sugiere que el efecto protector de las nanopartículas se mantiene estable en la fase inicial de exposición, pero a partir del mes de abril, las curvas de cambio de color comenzaron a divergir ligeramente, por ejemplo en el tratamiento 0 g.L⁻¹ (sin ZnO), mostró un incremento constante en el cambio de color, alcanzando aproximadamente 30 unidades hacia octubre, lo que indica una mayor susceptibilidad al fotodaño. La dosis de 0.5 g.L⁻¹ presentó los valores más altos de ΔE en el periodo

final (≈ 33 unidades), lo que podría atribuirse a una distribución no homogénea del ZnO o a fenómenos de dispersión de luz en la superficie. Los tratamientos con 1.0 a 5.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ de ZnO mostraron la menor pérdida cromática acumulada, lo que confirma su potencial como aditivo protector contra la radiación UV con valores finales de entre 30 y 32 unidades.

En general, los resultados demuestran que el ZnO contribuye a prolongar la vida útil estética de los recubrimientos de madera, aunque la durabilidad del efecto dependerá de la concentración, la homogeneidad del recubrimiento y las condiciones ambientales del sitio de exposición.

El comportamiento observado se alinea con lo reportado en estudios previos, donde las nanopartículas metálicas (particularmente ZnO y TiO_2) han mostrado capacidad para mitigar el amarillamiento y la pérdida de color en recubrimientos de madera expuestos al intemperismo natural o artificial (Salla et al., 2012). En este caso, el ZnO actuó como agente fotoprotector, absorbiendo la radiación UV y reduciendo la generación de radicales libres responsables de la ruptura de enlaces en la lignina (Figura 21).

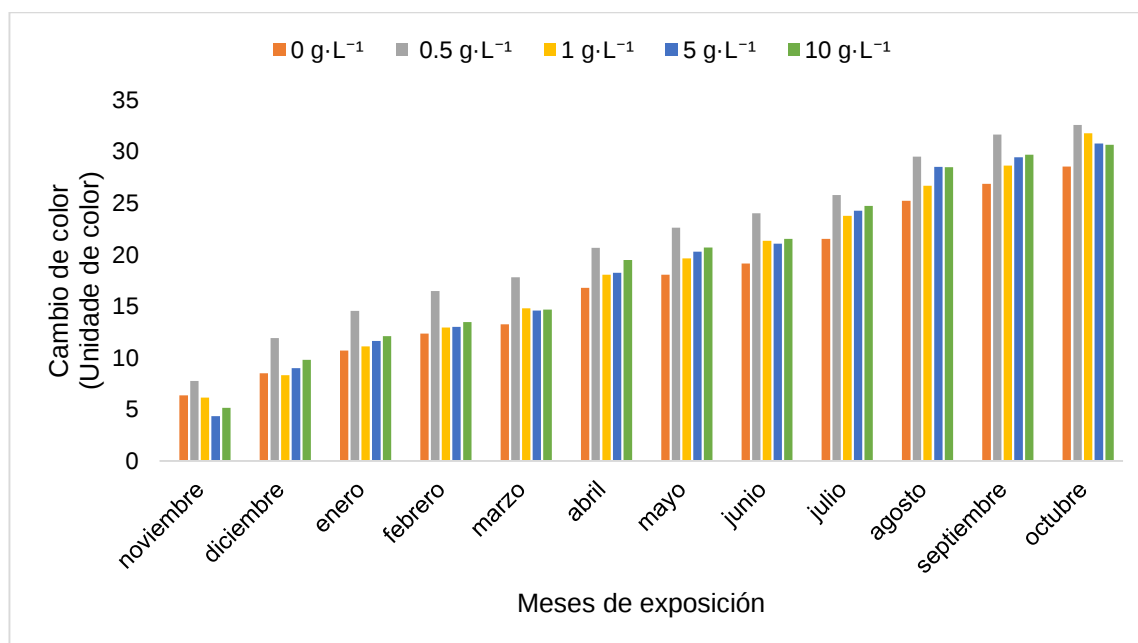


Figura 21. Cambio de color por dosis de aplicación durante 12 meses de exposición.

5.3.4. Cambio de color por tratamiento

El análisis de varianza para el cambio de color no mostró diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.47$), lo que indica que tras un año de exposición la concentración de ZnO no influyó de manera significativa en la variación del color superficial de la madera (Tabla 12).

Tabla 12. Análisis de varianza para el cambio de color en la madera tratada con ZnO.

Fuente de variación	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	55.43	4.00	13.86	0.91	0.47
Tratamiento	55.43	4.00	13.86	0.91	0.47
Error	380.88	25.00	15.24		
Total	436.31	29.00			

SC = Suma de cuadrados; gl = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = estadístico de Fisher; p-valor = nivel de significancia.

Los valores medios de cambio de color presentaron un rango de variación máxima de 4.04 unidades de color (UC), condición determinante para no encontrar diferencias estadísticas. (Tabla 13).

Tabla 13. Valores promedio para el cambio de color en la madera tratada por dosis de aplicación.

Dosis de aplicación (g.L ⁻¹)	n	Media* (UC)	E.E
0	6	28.55 a	1.59
10		30.66 a	1.59
5		30.78 a	1.59
1		31.79 a	1.59
0.5		32.59 a	1.59

*Letras iguales indican que las medias no son significativamente diferentes entre sí (Tukey $p > 0.05$).

Aunque no se observaron diferencias significativas entre tratamientos, se identifica una tendencia leve a una menor pérdida de color con el incremento moderado de ZnO (particularmente en las dosis de 0.5 a 1 g.L⁻¹). Esto sugiere que las nanopartículas podrían contribuir parcialmente a la estabilidad cromática de la madera al actuar como agentes fotoprotectores frente a la radiación ultravioleta (UV). Sin embargo, la falta de significancia estadística indica que, bajo condiciones prolongadas de exposición (12 meses), la acción protectora del ZnO podría disminuir por efectos de fotooxidación motivada por la intensidad solar, abrasión, humedad, lavado o pérdida del recubrimiento, abrasión o pérdida del recubrimiento, lo que reduce su capacidad de

mitigar la degradación fotoquímica de la lignina, responsable del oscurecimiento o decoloración del material (Gu et al., 2009).

A pesar de que las variaciones entre tratamientos fueron leves y no alcanzaron diferencias estadísticas significativas, sugiere que la influencia del ZnO se estabiliza después de cierto umbral de concentración. Dosis entre 1 y 5 g·L⁻¹ parecen ofrecer un equilibrio entre protección y transparencia del recubrimiento.

De acuerdo con Wojciechowski et al., (2014), la eficacia de los recubrimientos con nanopartículas metálicas depende no solo de la concentración, sino también de la dispersión, el tamaño de partícula, la compatibilidad con la matriz polimérica y las condiciones ambientales. En este caso, las dosis aplicadas mantuvieron el color relativamente estable sin producir efectos negativos, lo cual es favorable para la conservación estética de la madera en ambientes naturales.

5.3.5. Clasificación del cambio de color

El comportamiento de la exposición de la madera a la radiación ultravioleta muestra una tendencia de cambio de color en todos los tratamientos. De acuerdo con la clasificación de cambio de color de Cui et al. (2002), todos los tratamientos se clasifican como cambio total ya que fue mayor a 12 tonos (Tabla 14).

Tabla 14. Comparación de medias para el cambio de color en la madera tratada por dosis de aplicación.

Dosis de aplicación (g·L ⁻¹)	Cambio de color (ΔE^*)	Clasificación
0	28.55	Cambio extremo o decoloración severa; superficie grisácea o blanquecina.
10	30.66	
5	30.78	
1	31.79	
0.5	32.59	

El color superficial de la madera es uno de los primeros indicadores de degradación fotoquímica. La exposición a radiación ultravioleta (UV) causa la oxidación y ruptura de la lignina, generando compuestos quinónicos responsables del oscurecimiento y amarillamiento (Pandey, 2005). Posteriormente, la lixiviación de esos productos genera pérdida de color y aspecto grisáceo (Hon y Minemura, 2000).

Los resultados confirman que los recubrimientos barnizados (aun sin nanopartículas) disminuyen la decoloración al formar una barrera óptica y química entre la madera y el ambiente; mientras que la incorporación de nanopartículas de ZnO en el barniz refuerza este efecto protector, actuando como absorbedor de radiación UV y estabilizador fotocatalítico, lo que reduce la formación de radicales libres que deterioran la lignina (Cristea et al., 2010).

6. CONCLUSIONES

- Las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) poseen propiedades morfológicas, químicas y funcionales para su uso como agente protector en madera. La caracterización mediante SEM, EDS y espectrofotometría UV-visible confirmó la formación de partículas lisas y cuasi esféricas con tamaños entre 50 y 100 nm, un nivel adecuado para aplicaciones antimicrobianas y penetración en estructuras lignocelulósicas.
- Desde el punto de vista biológico, las dosis de 0.5 y 1 g·L⁻¹ de ZnO mostraron una eficacia significativa en la reducción de la pérdida de masa y del módulo de elasticidad dinámico (MOEdin), así que concentraciones moderadas son suficientes para alcanzar una protección efectiva. Además, estas dosis permitieron clasificar la madera como “durable”, en contraste con el testigo y el tratamiento sin nanopartículas, que presentaron degradación acelerada.
- En cuanto a la exposición a radiación UV, el cambio de brillo superficial está influenciado por la concentración de ZnO, siendo más pronunciado en dosis altas (10 g·L⁻¹), lo que podría atribuirse a la formación de capas densas de nanopartículas con mayor actividad fotocatalítica. Sin embargo, todas las dosis se clasificaron como “moderadas” en cuanto al cambio de brillo, lo que indica que el ZnO no compromete gravemente la estética del material tratado.
- En conjunto, los hallazgos respaldan el uso de nanopartículas de ZnO como una alternativa sustentable y eficaz frente a los preservantes convencionales, ofreciendo protección biológica y mecánica sin generar impactos negativos significativos en la apariencia de la madera. No obstante, se recomienda realizar estudios complementarios en condiciones reales de exposición para evaluar la retención, distribución y lixiviación del ZnO, así como su comportamiento ambiental a largo plazo.

7. REFERENCIAS

- Abrica-González, P., y Gómez-Arroyo, S. (2022). Efectos y caracterización de nanopartículas atmosféricas (NP-CuO, ZnO) en plantas. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 38. <https://doi.org/10.20937/RICA.54303>
- Adler, V., y Peciña-López, D. (14 de junio de 2022). *La madera como material de construcción de viviendas: ¿cuáles son sus beneficios?*. <https://blogs.iadb.org/ciudades-sostenibles/es/la-madera-como-material-de-construccion-de-viviendas-cuales-son-sus-beneficios/>
- Alsalamah, S. A., Alghonaim, M. I., & Al Abboud, M. A. (2025). Role of nanoparticles for wood protection from decaying microorganisms and their enzymes: A review study. *BioResources*, 20(3), 8119–8134. <https://ojs.bioresources.com/index.php/BRJ/article/view/24488>
- Aquino, P., Osorio, A., Ninán, E., & Torres, F. (2018). Caracterización de nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método de precipitación y su evaluación en la incorporación en pinturas esmalte. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 84(1), 5–17. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v84i1.151>
- Arias Cazco. P. J. (2010). *Diseño de un sistema de secado de madera para la empresa parquet “Los pinos”*. [Tesis de licenciatura]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Mecánica. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- ASTM International. (2014). *ASTM D523-14: Standard test method for specular gloss*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0523-14>
- Azizi, S., Ahmad, M., Mahdavi Shahri, M., & Abdolmohammadi, S. (2013). Preparation, characterization, and antimicrobial activities of ZnO nanoparticles/cellulose nanocrystal nanocomposites. *BioResources*, 8(2), 1841–1851. <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.1841-1851>

- Babayevska, N., Przysiecka, Ł., Iatsunskyi, I., & Others. (2022). ZnO size and shape effect on antibacterial activity and cytotoxicity profile. *Scientific Reports*, 12, Article 8148. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12134-3>
- Bahmani, M., Schmidt, O., & Clausen, C. A. (2016). *Antifungal efficacy of zinc oxide nanoparticles against wood-decay fungi*. *Holzforschung*, 70(9), 827–835. <https://doi.org/10.1515/hf-2015-0173>
- Balandrán-Quintana, R., & Wilson, A. (2021). Un acercamiento a los fundamentos y aplicaciones de la nanotecnología: An approach to the fundamentals and applications of nanotechnology. *TECNOCENCIA Chihuahua*, 15(3), 76–94. <https://doi.org/10.54167/tecnociencia.v15i3.861>
- Blanca Giménez, V., Ruiz Hernández, J. A., Zambrano Martínez, E., & Cárcel Carrasco, F. J. (2022). Columna ensamblada a partir de la utilización de madera reciclada, en el contexto de Bogotá, Colombia. En F. J. Cárcel Carrasco, L. Palmero Iglesias, & A. M. Martínez Corral (Coords.), *Libro de abstracts* (pp. 227–228). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8431360>
- BOBADILLA, ELISA ALICIA. (2005). DURABILIDAD NATURAL DE LA MADERA DE CINCO ESPECIES APTAS PARA LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 7(2), 134. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2005000200008>.
- Borges, C. C., Tonoli, G. H. D., Cruz, T. M., Duarte, P. J., & Junqueira, T. A. (2018). Nanoparticles-based wood preservatives: The next generation of wood protection? *CERNE*, 24(4), 397–407. <https://doi.org/10.1590/01047760201824042531>
- Brischke, C., & Rapp, A. (2008). Dose–response relationships between wood moisture content, wood temperature and fungal decay determined for 23 European field test sites. *Wood Science and Technology*, 42(6), 507–518. <https://doi.org/10.1007/s00226-008-0191-8>

- Carrillo-Parra, A., Hapla, F., Mai, C., & Garza-Ocañas, F. (2011). Durabilidad de la madera de *Prosopis laevigata* y efecto de sus extractos en hongos que degradan la madera. *Madera y bosques*, 17(1), 7–21. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712011000100001&lng=es&tlng=es
- Castro, F., & Mohali, S. (2020). Pudrición de las maderas de pino caribe y melina en suelos no estériles. *FAO*. <https://www.fao.org/4/XII/0659-B4.htm>
- Castro-Longoria, E. (2022). Producción de nanopartículas metálicas mediante el uso de los hongos: una alternativa contra microorganismos patógenos. *Revista de Farmacología*, 1(1), 12–17. <https://doi.org/10.58713/rf.v1i1.2>.
- Chen, C., Kuang, Y., Zhu, S., Burgert, I., Keplinger, T., Gong, A., ... & Hu, L. (2020). Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. *Nature Reviews Materials*, 5(9), 642–666. Doi: 10.1038/s41578-020-0195-z
- Clausen, C. A., Green III, F., & Nami Kartal, S. (2010). Weatherability and leach resistance of wood impregnated with nano-zinc oxide. *Nanoscale research letters*, 5(9), 1464. Doi: 10.1007/s11671-010-9662-6
- Córdoba Mosquera, K. A. (2009). Resistencia natural de *guadua angustifolia kunth* al ataque de hongos ligninolíticos como alternativa hacia nuevas posibilidades de uso [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana]. Bogotá. <https://doi.org/10.23857/pc.v9i1>
- Cristea, M. V., Riedl, B., & Blanchet, P. (2010). Enhancing the performance of exterior waterborne coatings for wood by inorganic nanosized UV absorbers. *Progress in Organic Coatings*, 69(4), 432–441. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2010.08.006>
- Cueto, A., Canga Líbano, E., Sánchez García, S., Hevía Cabal, A., Feito Díaz, I., Menéndez-Miguélez, M., González-García, M., Martínez Alonso, C., & Majada Guijo, J. P. (2015). Innovación de procesos y productos en el sector de la madera. En Conferencias y Ponencias del 6º Congreso Forestal Español. Cuadernos de

- la Sociedad Española de Ciencias Forestales, 39, 323–336.
<https://doi.org/10.31167/csef.v0i39.17471>
- Cui, G., Luo, M. R., Rigg, B., Roesler, G., & Witt, K. (2002). Uniform colour spaces based on the DIN99 colour-difference formula. *Color Research & Application*, 27(4), 282–290. <https://doi.org/10.1002/col.10066>
- Cui, W., Zhang, N., Xu, M., & Others. (2017). Combined effects of ZnO particle deposition and heat treatment on dimensional stability and mechanical properties of poplar wood. *Scientific Reports*, 7, Article 9961. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10606-5>
- Curling, S., Clausen, C., & Winandy, J. (2002). Experimental method to quantify progressive stages of decay of wood by basidiomycete fungi. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 49(1), 1–8. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(01\)00101-9](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(01)00101-9)
- Dávalos Sotelo, R. (2016). Importancia ecológico-económica del aprovechamiento de los bosques. *Madera Y Bosques*, 2(2), 3–10. <https://doi.org/10.21829/myb.1996.221382>
- de Francisco, M., Romeiro, A., Durães, L., & Others. (2024). Environmental behaviour of synthesized and commercial agricultural zinc products: Leaching, migration, and availability in soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24, 5293–5308. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01908-5>
- Dendisová, M., Jenišťová, A., Parchaňská-Kokaislová, A., Matějka, P., Prokopec, V., & Švecová, M. (2018). The use of infrared spectroscopic techniques to characterize nanomaterials and nanostructures: A review. *Analytica Chimica Acta*, 1031, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.05.046>
- Dey, S., Mohanty, D. L., Divya, N., Bakshi, V., Mohanty, A., Rath, D., ... Sabui, R. (2025). A critical review on zinc oxide nanoparticles: Synthesis, properties and biomedical applications. *Intelligent Pharmacy*, 3(1), 53–70. <https://doi.org/10.1016/j.ipha.2024.08.004>

- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., González, L., Tablada, M., y Robledo, C.W. (2020). InfoStat versión 2020. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Divos, F. (2004). Nondestructive Testing of Wood-A new course offered by the University of West Hungary, Sopron. *Faipar*. 45(2): 25-32.
- Durbán García, M., Espejo, T., López-Montes, A., & Blanc, R. (2019). Colorimetric study of traditional varnishes applied on paper exposing to aging tests. *Óptica Pura y Aplicada*, 52(1), 1–14. <https://doi.org/10.7149/OPA.52.1.51018>
- EN 350. (2016). *Durability of wood and wood-based products — Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials*. European Committee for Standardization.
- EN 350-1. (1994). European Norm 350-1. Natural durability of solid wood. Part 1: Guide to the principles of testing and classification of the natural durability of wood. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.
- Encinas, O. (2004). *Conservación de maderas*. Grupo de Investigación en Conservación de Maderas (GICOM). Universidad de Los Andes.
- European Committee for Standardization. (2001). European Pre-Norm ENV 807. Wood preservatives. Determination of the effectiveness against soft rotting micro-fungi and other soil inhabiting micro-organisms. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium. .
- Farahani, M. R. M., & Banikarim, F. (2013). Effect of nano-zinc oxide on decay resistance of wood-plastic composites. *BioResources*, 8(4), 5715-5720.
- Faure, B., Salazar-Alvarez, G., Ahniyaz, A., Villaluenga, I., Berriozabal, G., De Miguel, Y. R., & Bergström, L. (2013). Dispersion and surface functionalization of oxide nanoparticles for transparent photocatalytic and UV-protecting coatings and sunscreens. *Science and technology of advanced materials*, 14(2), 023001.

- Fornaguera, C., y Solans, C. (2018). Métodos analíticos para caracterizar y purificar nanopartículas poliméricas. *Revista Internacional de Ciencia de Polímeros*, 30(3), 234-250
- Fournier-Zepeda, R. (2008). Construcción sostenible y madera: realidades, mitos y oportunidades. *Tecnología en Marcha*, 21(4), 92-101. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4835621>
- Garay, R. M., Tapia, R., Castillo, M., Fernández, O., & Vergara, J. (2018). Habitabilidad de edificaciones y ranking de discriminación basado en seguridad y sustentabilidad frente a eventuales desastres: Estudio de caso: Viviendas de madera. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 2(2), 28–45. <https://doi.org/10.55467/reder.v2i2.16>
- Ortega, M., & Benedetti, S. (2021). La madera como material para la construcción: mitos, realidades y oportunidades. Instituto Forestal de Chile. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/31358>
- Sanz, S., Riera, A., Oliver-Villanueva, J.-V., Doménech, M., & Domínguez, E. (2024). Metodología BIM e IFC en la mejora de la eficiencia energética de la arquitectura en madera del suroeste europeo. *VLC arquitectura. Research Journal*, 11, 139–165. <https://doi.org/10.4995/vlc.2024.20244>
- Goddio, M., Mancini, S., Gervasio, S., & López, G. (2013). Nanotecnología aplicada a la preservación de maderas. En 13º Congreso Internacional en Ciencia y Tecnología de Metalurgia y Materiales 2013: Simposio internacional sobre materiales lignocelulósicos. Argentina. <https://doi.org/10.13140/2.1.3195.5202>
- González Ruiz, G., Baena Díaz, B., Gómez Domínguez, W., & Mercado Mendoza, Y. (2012). Riesgo de exposición a compuestos químicos en trabajadores de transformación de la madera. *Hacia la Promoción de la Salud*, 17(1), 105-117. <http://www.scielo.org.co/pdf/hpsal/v17n1/v17n1a08.pdf>

- Gu, X., Zhe, D., Zhao, M., Chen, G., Ly, N., Stutzman, P., Sung, L., Nguyen, T., & Chin, J. (2009). *Long-term performance of nano-filled polymeric materials: Effect of ZnO nanoparticles on photodegradation of a waterborne polyurethane coating*. Ponencia presentada en el 2009 CoatingsTech Conference, Indianapolis, IN.
- Guerra, D. C., Saldaña, M. S., Zacarias, D. C., Hermosillo, M. G., López, L. W., Segoviano, M. H., ... Segoviano, J. P. (2024). Síntesis de partículas de TiO₂ por el método sol-gel y formulación del sistema TiO₂/Quitano asistidas por ultrasonido. *Jóvenes en la Ciencia*, 28. <https://doi.org/10.15174/jc.2024.4461>
- Harandi, D., Ahmadi, H., & Achachluei, M. M. (2016). Comparison of TiO₂ and ZnO nanoparticles for the improvement of consolidated wood with polyvinyl butyral against white rot. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 108, 142–148. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.12.017>
- Hodoroaba, V.-D., Rades, S., Salge, T., Mielke, J., Ortel, E., & Schmidt, R. (2016). Characterisation of nanoparticles by means of high-resolution SEM/EDS in transmission mode. En 14th European Workshop on Modern Developments and Applications in Microbeam Analysis (EMAS 2015 Workshop), 3–7 May 2015, Portorož, Slovenia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 109, 012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/109/1/012006>
- Hon, D. N. S., & Minemura, N. (2000). Color and discoloration. *Wood and cellulosic chemistry*, 385-442.
- Honorato Salazar, J. A., y Hernández Pérez, J. (2016). 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>
- Ibáñez, C., Mantero, C., Silva, L., Rabinovich, M., Escudero, R., y Franco, J. (2012). Preservación de madera tratada con Zn y Mn y efectividad de tratamiento antilixiviante con bórax. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 14(2), 165-174. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2012000200004>

- Ijaz, I., Gilani, S. E., Nazir, A., & Bukhari, A. (2020). Detail review on chemical, physical and green synthesis, classification, characterizations and applications of nanoparticles. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 13(1), 59–81. <https://doi.org/10.1080/17518253.2020.1802517>
- Irede, E. L., Awoyemi, R. F., Owolabi, B., Aworinde, O. R., Kajola, R. O., Hazeez, A., ... & Ifijen, I. H. (2024). Cutting-edge developments in zinc oxide nanoparticles: synthesis and applications for enhanced antimicrobial and UV protection in healthcare solutions. *RSC advances*, 14(29), 20992-21034.
- Jirouš-Rajković, V., & Miklečić, J. (2021). Enhancing weathering resistance of wood—A review. *Polymers*, 13(12), 1980. <https://doi.org/10.3390/polym13121980>
- Jnido, G., Ohms, G., & Viöl, W. (2021). Deposition of zinc oxide coatings on wood surfaces using the solution precursor plasma spraying process. *Coatings*, 11(2), 183. <https://doi.org/10.3390/coatings11020183>
- Keey, R. B. (2005). Colour development on drying. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 7(1), 3–16. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2005000100001>
- Keil, G., C. Taraborelli, M. Refort, L Maly & R. Cámara. (2016). Evaluación de recubrimientos de uso exterior aplicados en madera de Pino ponderosa (*Pinus ponderosa* Douglas exLaws) expuesta en el partido de La Plata, Argentina. V *Congreso Iberoamericano de Protección de la Madera RIPMA*. 10 pp.
- Khan, A. U. H., Liu, Y., Naidu, R., Fang, C., Shon, H. K., Zhang, H., & Dharmarajan, R. (2024). Changes in the aggregation behaviour of zinc oxide nanoparticles influenced by perfluorooctanoic acid, salts, and humic acid in simulated waters. *Toxics*, 12(8), 602. <https://doi.org/10.3390/toxics12080602>
- Kirker, G. T., Blodgett, A. B., Arango, R. A., Lebow, P. K., & Clausen, C. A. (2013). The role of extractives in naturally durable wood species. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 82, 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.03.007>

- Kúdela, J., Ihracký, P., & Kačík, F. (2024). Discoloration and surface changes in spruce wood after accelerated aging. *Polymers*, 16(9), 1191. <https://doi.org/10.3390/polym16091191>
- Labbe, C. (2024). Optimización en madera masiva: Parámetros de diseño para un edificio de vivienda en Talca, Chile. *Anales de Arquitectura UC*, (19), 162–171. <https://doi.org/10.7764/AA.2024.19>
- Langer, G. J., & Bußkamp, J. (2021). Fungi associated with woody tissues of European beech and their impact on tree health. *Frontiers in Microbiology*, 12, 702467. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.702467>
- Leal, M. (2011). La nanotecnología: ¿Un camino a la esperanza? *Revista de la Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad de Carabobo*, 15(3), 1-10.
- Lenka, S., & Badamali, S. K. (2023). Nanostructured ZnO as an efficient heterogeneous photocatalyst towards degradation of lignin under visible light irradiation. *Molecular Catalysis*, 536, 112918. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2023.112918>
- Lestari, L., & Ikaputra, I. (2024). Toward sustainable construction using wood material: A review of indicator-based sustainability assessments. *International Journal of Environment, Architecture, and Societies*, 4(2), 77–90. <https://doi.org/10.26418/ijeas.2024.4.02.77-90>
- Marais, B., Brischke, C., & Militz, H. (2020). Wood durability in terrestrial and aquatic environments – A review of biotic and abiotic influence factors. *Wood Material Science & Engineering*, 17(1), 1–24. <https://doi.org/10.1080/17480272.2020.1779810>
- Martín, J. A., & López, R. (2023). Biological deterioration and natural durability of wood in Europe. *Forests*, 14(2), 283. <https://doi.org/10.3390/f14020283>
- Mauleon, K. (2019). *Síntesis de nanopartículas de óxido de zinc a partir de extractos de Stevia rebaudiana y Moringa oleífera* [Tesis de maestría]. Universidad de Papaloapan.

- Medina, M., Miguel, E., Galván, R., Luis, E., & Reyes, G. (2015). Las nanopartículas y el medio ambiente. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 19(74), 49–58. Recuperado el 13 de noviembre de 2025, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212015000100005&lng=es&tlng=es
- Mena-Morales, C., Morales-Rodríguez, C., Vargas-Venegas, I., Villalobos-Quintanilla, B., y Viquez-Muñoz, V. (2023). Aplicaciones biotecnológicas de la degradación bioquímica de madera por acción de hongos Xilófagos: pudrición parda y blanca. *Revista Tecnología en Marcha*, 36(1), 97-105.
- Moghri Moazzen, M. A., Borghei, S. M., & Taleshi, F. (2013). Change in the morphology of ZnO nanoparticles upon changing the reactant concentration. *Applied Nanoscience*, 3(4), 295-302.
- Novoa Robles, L. A. (2006). Manual de buenas prácticas de manufactura para la preservación de madera aserrada: acorde a los estándares expresados en las propuestas de normas (versión preliminar). Cuarto informe bimensual. Programa de desarrollo de políticas de comercio exterior 1442 / OC-PE. Dirección Nacional de Desarrollo de Comercio Exterior.
- Numan A. (2021). *Contemporary nanomaterials in material engineering applications*. 1a ed. Springer International Publishing, Cham, Switzerland.
- Núñez-Retana, V. D., González-Tagle, M. A., González-Rodríguez, H., Yáñez-Díaz, M. I., & Himmelsbach, W. (2024). Métodos destacados para la protección de la madera. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 15(84), 155-175. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i84.1441>
- Onofre Laguna, A. (2000). Recubrimientos para superficies de madera [Tesis profesional, Universidad Nacional Autónoma de México]. Cuautitlán Izcalli, Estado de México.
- Ontiveros-Moreno, Y., Colín-Urieta, S., Carrillo-Parra, A., López-Camacho, E. B., Corral-Rivas, J. J., Hernández-Díaz, J. C., y Prieto-Ruiz, J. Á. (2024).

- Durabilidad natural de la madera de seis especies de importancia comercial en México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(84), 132-154. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i84.1453>
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE). (2014). *Industria de la Construcción - Madera - Especificaciones y Métodos de Ensayo para la Calificación y Clasificación Visual de Madera Dimensionada de Pino para usos Estructurales* (NMX-C-239-ONNCCE-2014). https://www.onncce.org.mx/es/?option=com_merchant&view=category&cid=24
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE). (2001). *Industria de la Construcción - Vivienda de Madera y Equipamiento Urbano - Dimensiones de la Madera Aserrada para su uso en la Construcción* (NMX-C-224-ONNCCE-2001). https://www.onncce.org.mx/es/?option=com_merchant&view=category&cid=24
- Pandey, K. K. (2005). Study of the effect of photo-irradiation on the surface chemistry of wood. *Polymer degradation and Stability*, 90(1), 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.02.009>
- Papadopoulos, A. N. (2023). Nanotechnology and Wood Science. *Nanomaterials*, 13(4), 691 <https://doi.org/10.3390/nano13040691>
- Papadopoulos, A. N., & Taghiyari, H. R. (2019). Innovative wood surface treatments based on nanotechnology. *Coatings*, 9, 866. <https://doi.org/10.3390/coatings9120866>
- Papadopoulos, A. N., Bikiaris, D. N., Mitropoulos, A. C., & Kyzas, G. Z. (2019). Nanomaterials and chemical modifications for enhanced key wood properties: A review. *Nanomaterials*, 9(4), 607. Doi: 10.3390/nano9040607
- Patil, R. S., Thomas, J., Patil, M., & John, J. (2023). To Shed Light on the UV Curable Coating Technology: Current State of the Art and Perspectives. *Journal of Composites Science*, 7(12), 513. <https://doi.org/10.3390/jcs7120513>

- Paul, D., Humar, M., Tesařová, D., Petrič, M., & Gaff, M. (2025). Nanoparticle-based impregnation coatings for wood: improving hydrophobicity, mechanical properties, and blue stain fungi resistance through structure–property relationship. *Journal of Materials Science*, 60:13381–13397.
- Pozzer, J. A., y Guzowski, E. (2011). *Materiales y materias primas*. Ministerio de Educación. Buenos Aires, Argentina.
- Rodríguez Anda, R., & Fuentes Talavera, F. J. (2003). Factores que intervienen en el proceso de envejecimiento de la madera. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(1), 95-100.
- Ross, R. J. (2015). *Nondestructive evaluation of wood* (2nd ed.). General Technical Report FPL-GTR-238. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-238>
- Ruwoldt, J., Blindheim, F. H., & Chinga-Carrasco, G. (2023). Functional surfaces, films, and coatings with lignin – a critical review. *RSC Advances*, 18, 2023.
- Salla, J., Pandey, K. K., & Srinivas, K. (2012). Improvement of UV resistance of wood surfaces by using ZnO nanoparticles. *Polymer degradation and stability*, 97(4), 592-596. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.01.013>
- Sandor, M., & Schrader, S. (2012). Interaction of earthworms and enchytraeids in organically amended soil. *North-western journal of zoology*, 8(1).
- Sirelkhatim, A., Mahmud, S., Seeni, A., Kaus, N. H. M., Ann, L. C., Bakhori, S. K. M., ... & Mohamad, D. (2015). Review on zinc oxide nanoparticles: antibacterial activity and toxicity mechanism. *Nano-micro letters*, 7(3), 219-242. doi: 10.1007/s40820-015-0040-x.
- Sommerauer, L., Petutschnigg, A., & Schnabel, T. (2023). Investigation of Impregnation Approach of Zinc Oxide Nano-Dispersions for Potential UV Stabilization in *Abies alba* and *Fagus sylvatica*. *Compounds*, 3(4), 561-572. <https://doi.org/10.3390/compounds3040040>

- Sreejaya, M., Sankar, R. J., K, R., Pillai, N. P., Ramkumar, K., Anuvinda, P., Meenakshi, V., & Sadanandan, S. (2022). Lignin-based organic coatings and their applications: A review. *Materials Today Proceedings*, 60, 494-501 DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.325
- Tamarit Urias, J. C., Borja de la Rosa, A., Flores Velázquez, R., y Corona Ambríz, A. (2002). Vida útil de dos barnices para exteriores mediante intemperismo artificial en madera de aile, pino y encino. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 8(1), 83-90.
- Taraborelli, C., Refort, M. M., Spavento, E. M., Maly, L. E., Acuña, L., Camera, R., & Keil, G. D. (2020). Evaluación de tratamientos superficiales en madera expuesta a condiciones de intemperismo natural. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 119(1), 1-12. <https://doi.org/10.24215/16699513e039>
- UNE-EN 927-3. (2000). Pinturas y barnices: materiales de recubrimiento y sistemas de recubrimiento para madera exterior. Ensayo de envejecimiento natural, Parte 3.
- Uyup, M. K. A., Khadiran, T., Husain, H., Salim, S., Siam, N. A., & Hua, L. S. (2019). Resistance improvement of rubberwood treated with zinc oxide nanoparticles and phenolic resin against white-rot fungi, *Pycnoporus sanguineus*. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 21(4), 457-466. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000403>
- Vaca de Fuentes, R. B. (1998). *Técnicas para la preservación de maderas, Documento Técnico 65*. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible BOLFOR.
- Vidican, R., & Sandor, V. (2015). Microcosm experiments as a tool in soil ecology studies. *Bulletin USAMV series Agriculture*, 72(1). <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-agr:10618>
- Winandy, J. E., & Morrell, J. J. (1993). Relationship between incipient decay, strength, and chemical composition of Douglas-fir heartwood. *Wood and Fiber Science*, 25(3), 278–288.

- Wojciechowski, K., Skowera, E., Pietniewicz, E., Zukowska, G. Z., van der Ven, L. G., Korczagin, I., & Malanowski, P. (2014). UV stability of polymeric binder films used in waterborne facade paints. *Progress in Organic Coatings*, 77(2), 298-304.
- Woodard, A. C., & Milner, H. R. (2016). Sustainability of timber and wood in construction. In *Sustainability of construction materials* (pp. 129-157). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100370-1.00007-X>
- Yang, X. (2024). Review of Studies on Performance of Dowel Connections Loaded Perpendicular to Grain. *Academic Journal of Science and Technology*, 11(1), 77-80.
- Yang, Z., Jiang, Z., Hse, C. Y., & Liu, R. (2017). Assessing the impact of wood decay fungi on the modulus of elasticity of slash pine (*Pinus elliottii*) by stress wave non-destructive testing. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 117, 123-127. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.12.003>
- Yupa, E. S., Agyms, T. A., Fernando, V. E., Sidabutar, Y. F., & Suciati, H. (2024). Analisis Penggunaan Kayu sebagai Bahan Konstruksi dalam Pembangunan: Studi Kasus dan Observasi Lapangan. *Zona Sipil: Program Studi Teknik Sipil Universitas Batam*, 14(1), 1-6. <https://doi.org/10.37776/zs.v14i1.1471>
- Zabel, R. A., & Morrell, J. J. (2020). *Wood microbiology: Decay and its prevention* (2nd ed.). Academic Press.
- Zhou, X. Q., Hayat, Z., Zhang, D. D., Li, M. Y., Hu, S., Wu, Q., ... & Yuan, Y. (2023). Zinc oxide nanoparticles: synthesis, characterization, modification, and applications in food and agriculture. *Processes*, 11(4), 1193. <https://doi.org/10.3390/pr11041193>