

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 PROFESIONALES

Evaluación de las propiedades antifúngicas de
las nanopartículas de óxido de zinc en madera de
Quercus sp y *Juniperus* sp

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el título
de INGENIERA FORESTAL

PRESENTA:

MERCEDES YESSAMIN VITRAGO VALLE

El Salto, Durango

febrero de 2026

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE EL SALTO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

La presente tesis titulada:

Evaluación de las propiedades antifúngicas de las nanopartículas de óxido de zinc en madera de *Quercus sp* y *Juniperus sp*

Realizada por:

MERCEDES YESSAMIN VITRAGO VALLE

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

INGENIERA FORESTAL

COMITÉ DE TESIS



Dr. Ricardo de la Cruz
Carrera

ASESOR



Dr. Juan Abel Nájera Luna

DIRECTOR



M. C. Pedro Meza López

ASESOR

El Salto, Durango

febrero de 2026

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mi madre **Carmen Mercedes Valle Guerrero**, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional, por la confianza y fe que me impulsaron en todo momento a dar lo mejor de mí.

Agradezco también a mi hermana **Amairani Jazmin Vitrago Valle**, por ser una gran amiga para mí, que junto a sus ideas hemos pasado momentos inolvidables y uno de los seres más importantes en mi vida.

A mi esposo, que durante estos años de carrera ha sabido apoyarme para continuar y nunca renunciar, gracias por tu amor incondicional y por ayudarme en este proyecto.

A mis tres amigas, compañeras y colegas, gracias por acompañarme en este proceso, entre risas, bromas, enojos y tardes de comidas, hoy culminamos con éxito este gran proyecto en el que fueron gran compañía, las quiero.

A mi pilar más grande mi hija **Sofia** y mis sobrinas, quienes son mi motivación y fuerza para continuar adelante con mi formación profesional. Pese a sus cortas edades me han enseñados tanto en esta vida, y sobre todo me han brindado su amor incondicional.

En honor a mi abuela **Susana** y mi tía **Elizabeth**, mi fuente de inspiración y sabiduría. Aunque ya no estén físicamente conmigo, su espíritu y amor continúan guiándome en cada paso de este camino.

Mercedes Yessamin Vitrago Valle

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Tecnológico de El Salto por brindarme la oportunidad de culminar mis estudios en la ingeniería.

A los profesores que me acompañaron en este recorrido, por los conocimientos transmitidos y brindar las herramientas necesarias para ser más competente en el ámbito profesional.

Al Doctor Juan Abel Nájera Luna por su amistad, por su confianza y el apoyo que me brindó durante la carrera y la residencia. Por la orientación y ayuda para la realización de esta tesis.

Al Maestro en Ciencias Pedro Meza López por su amistad y disposición de formar parte del comité de tesis, por la revisión del documento y las valiosas aportaciones para enriquecer el trabajo.

Al Doctor Ricardo de la Cruz Carrera por su amistad y por formar parte del comité de tesis, por su confianza y paciencia, sus acertadas observaciones y sus valiosos consejos para ayudarme a mejorar este trabajo.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	3
2.1. General	3
2.1.1. Específicos	3
2.2. Hipótesis de trabajo	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1. Madera	4
3.2. Durabilidad de la madera	4
3.2.1. Durabilidad natural de la madera	5
3.2.1.1. Determinación de la durabilidad natural de la madera	5
3.2.1.2. Pruebas aceleradas en laboratorio	6
3.2.1.3. Índice de durabilidad natural	6
3.2.2. Pérdida de masa	7
3.3. Agentes degradadores de madera	7
3.3.1. Desgaste mecánico	8
3.3.2. Degradación física	8
3.3.3. Insectos	8
3.3.4. Hongos	9
3.3.4.1. Pudrición parda o cúbica	10
3.3.4.2. Pudrición blanca o fibrosa	11
3.3.4.3. Pudrición blanda	11
3.4. Tratamientos con nanotecnología	11
3.4.1. Antecedentes de tratamientos con nanotecnología	12
3.5. Módulo de elasticidad	14
3.6. Descripción de las especies de estudio	14
3.6.1. <i>Quercus</i> sp	14
3.6.2. <i>Juniperus</i> sp	15
4. MATERIALES Y MÉTODOS	17
4.1. Área de estudio	17
4.2. Colecta del material	17
4.3. Síntesis de nanopartículas de óxido de zinc	18
4.3.1. Preparación de las probetas	19
4.3.2. Preparación del suelo	20
4.3.3. Acondicionamiento de las probetas	21
4.3.4. Distribución de las probetas	22
4.3.5. Inspección de las probetas	22
4.3.6. Pérdida de masa	23
4.3.6.1. Clasificación de la durabilidad de la madera por pérdida de masa	23
4.4. Procesamiento de información	25
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
5.1. Pérdida de masa	26
5.1.1. Por género	26
5.1.2. Por género y dosis de aplicación de NpsZnO	27
5.2. Pérdida de MOE _{din}	28
5.2.1. Por género	28

5.2.2.	Por género y dosis de aplicación de NpsZnO	29
5.3.	Clasificación de la durabilidad de la madera tratada con NpsZnO.....	29
5.4.	Comportamiento general de la pérdida de masa durante el periodo de evaluación	30
5.4.1.	Para la madera de <i>Juniperus</i> sp.....	30
5.4.2.	Para la madera de <i>Quercus</i> sp.....	31
5.5.	Comportamiento general de la pérdida de MOE _{din} durante el periodo de evaluación	33
5.5.1.	Para la madera de <i>Juniperus</i> sp.....	33
5.5.2.	Para la madera de <i>Quercus</i> sp.....	34
6.	CONCLUSIONES.....	36
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio.	17
Figura 2. Colecta de material.	18
Figura 3. Síntesis de nanopartículas de óxido de zinc.	19
Figura 4. Elaboración de las probetas.	20
Figura 5. Preparación del suelo.	20
Figura 6. Impregnación de las probetas con nanopartículas de óxido de ZnO.	21
Figura 7. Estufado de las probetas.	21
Figura 8. Distribución de las probetas en el microcosmo.	22
Figura 9. Inspección de las probetas en las semanas 8, 16, 24 y 32.	22
Figura 10. Adiamiento para captar las vibraciones de frecuencia en las probetas.	24
Figura 11. Pérdida de masa para la madera de <i>Juniperus</i> sp y el testigo por dosis de NpsZnO.	31
Figura 12. Pérdida de masa para la madera de <i>Quercus</i> sp y el testigo por dosis de NpsZnO.	32
Figura 13. Pérdida de MOE dinámico para la madera de <i>Juniperus</i> sp y el testigo por dosis de NpsZnO.	33
Figura 14. Pérdida de MOE dinámico para la madera de <i>Quercus</i> sp y el testigo por dosis de NpsZnO.	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de la durabilidad de la madera en función a la pérdida de masa.	23
Tabla 2. Análisis de varianza no paramétrica para la pérdida de masa por género.	26
Tabla 3. Análisis de varianza no paramétrica para la pérdida de masa por género y dosis de aplicación de nanopartículas de ZnO.	27
Tabla 4. Análisis de varianza no paramétrica para la pérdida de MOE dinámico por género.	28
Tabla 5. Análisis de varianza no paramétrica para la pérdida del MOE dinámico por género y dosis de aplicación de nanopartículas de ZnO.	29
Tabla 6. Índice de clasificación de la durabilidad de la madera.	30

RESUMEN

La madera, por su naturaleza orgánica, es susceptible al biodeterioro y a la acción de la humedad, factores que limitan su desempeño estructural y reducen su vida útil. En este estudio se evaluó la actividad antifúngica de nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO) aplicadas en madera de *Juniperus* sp. y *Quercus* sp., recolectadas en El Salto, Durango, mediante el método de microcosmos terrestre. Las probetas de 10×5×100 mm se prepararon conforme a la pre-norma europea y se impregnaron por vacío con cuatro concentraciones de NPsZnO: 0.0, 0.5, 1.0 y 5.0 g·L⁻¹. Posteriormente, se expusieron durante 32 semanas en suelo forestal de El Salto, Durango manteniendo una humedad entre 50 y 90 % de la capacidad de retención de agua. Se realizaron evaluaciones en las semanas 8, 16, 24 y 32 para determinar la pérdida de masa y del módulo de elasticidad dinámico (MOE_{din}) como indicadores de deterioro, comparando los resultados con madera testigo de *Fagus* sp. Los resultados indicaron que *Juniperus* presentó la menor pérdida de masa, *Fagus* un comportamiento intermedio y *Quercus* la mayor, evidenciando una mayor susceptibilidad biológica de este último género. La interacción género×dosis mostró que *Juniperus* tratado con 0.5 g·L⁻¹ fue el tratamiento más eficaz para reducir la pérdida de masa, mientras que la dosis de 5.0 g·L⁻¹ se asoció con mayores pérdidas. En *Quercus*, las pérdidas fueron elevadas en todas las dosis, con el peor desempeño a 1.0 g·L⁻¹. Respecto a la pérdida de MOE_{din}, *Quercus* presentó la mayor pérdida, seguido de *Juniperus*, mientras que el testigo mostró la menor. La clasificación del índice “x” indicó que *Juniperus* con 0.5 g·L⁻¹ fue “moderadamente durable”, mientras que *Quercus* se clasificó predominantemente como “poco durable”, independientemente de la dosis aplicada.

Palabras clave: Biodeterioro, durabilidad, madera, microcosmos terrestre, nanopartículas de ZnO.

ABSTRACT

Wood, due to its organic nature, is susceptible to biodeterioration and moisture, factors that limit its structural performance and reduce its service life. This study evaluated the antifungal activity of zinc oxide nanoparticles (NPsZnO) applied to *Juniperus* sp. and *Quercus* sp. wood collected in El Salto, Durango, using a terrestrial microcosm method. Specimens of 10×5×100mm were prepared according to a European pre-standard and vacuum-impregnated with four NPsZnO concentrations: 0.0, 0.5, 1.0, and 5.0 g·L⁻¹. They were then exposed for 32 weeks in forest soil maintaining moisture between 50 and 90% of the soil water-holding capacity. Assessments were conducted at weeks 8, 16, 24, and 32 to determine mass loss and dynamic modulus of elasticity loss (MOE_{dyn}) as deterioration indicators, and results were compared with *Fagus* sp. control wood. The results showed that *Juniperus* exhibited the lowest mass loss, *Fagus* an intermediate response, and *Quercus* the highest, indicating greater biological susceptibility of the latter genus. The genus×dose interaction showed that *Juniperus* treated with 0.5 g·L⁻¹ was the most effective treatment for reducing mass loss, whereas 5.0 g·L⁻¹ was associated with higher losses. In *Quercus*, losses were high across all doses, with the poorest performance at 1.0 g·L⁻¹. Regarding MOE_{dyn} loss, *Quercus* showed the greatest reduction, followed by *Juniperus*, while the control exhibited the lowest loss. The “x” index classification indicated that *Juniperus* treated with 0.5 g·L⁻¹ was “moderately durable,” whereas *Quercus* was predominantly classified as “slightly durable,” regardless of the applied dose.

Keywords: *Biodeterioration; durability; wood; terrestrial microcosm; ZnO nanoparticles.*

1. INTRODUCCIÓN

La madera es uno de los materiales más utilizados a nivel mundial debido a su versatilidad, disponibilidad y propiedades físico-mecánicas (Vignote et al., 2000). No obstante, su naturaleza orgánica la hace susceptible a procesos de biodegradación y a la acción del agua, factores que limitan su vida útil y desempeño en distintas aplicaciones. En este contexto, la protección de la madera se ha convertido en un aspecto clave dentro del mercado maderero global, al representar un reto constante para la conservación y durabilidad de los productos maderables (Cádenas-Paba y Polanco-Tapia, 2007).

Ante esta problemática, se han desarrollado diversas tecnologías de protección orientadas a preservar la madera frente a agentes bióticos y abióticos, permitiendo mejorar su resistencia y prolongar su uso en condiciones ambientales adversas (Chen et al., 2020). Asimismo, la implementación de tratamientos de protección constituye una estrategia fundamental para incrementar la resistencia a la biodegradación y al deterioro por humedad (Berrocal-Jiménez, 2006).

La calidad, durabilidad y comportamiento frente a la degradación de los productos maderables dependen de múltiples factores, entre los que destacan la humedad ambiental, la temperatura, la densidad de la madera y el tipo de tratamiento aplicado. La interacción de estas variables condiciona el desempeño del material y su respuesta frente a los agentes degradantes, lo que resalta la importancia de seleccionar y optimizar adecuadamente los métodos de protección empleados (Gerardin, 2016).

En concordancia con los avances en tecnologías de protección de la madera, durante los últimos años se han desarrollado múltiples investigaciones orientadas a la identificación de alternativas de preservación que sean eficientes, económicamente viable y ambientalmente sostenibles. Entre estas estrategias se encuentran los tratamientos tradicionales, ampliamente documentados y utilizados en el ámbito industrial (Peraza, 2002). Paralelamente, han surgido enfoques innovadores basados

en la aplicación de nanotecnologías, los cuales han mostrados un notable potencial para mejorar la protección y durabilidad de la madera (Teng et al., 2018).

Con el interés creciente se han realizado diversas investigaciones preliminares que han abordado la evaluación de formulaciones preservantes para la madera basadas en nanopartículas metálicas, principalmente de cobre, zinc y boro, en algunos casos combinadas con plata debido a sus reconocidas propiedades bactericidas (Núñez-Retana et al., 2024). Estas formulaciones, aplicadas tanto en soluciones como en suspensiones y con o sin la incorporación de agentes surfactantes, han demostrados potencial para la protección de la madera frente al ataque de microorganismos, insectos xilófagos y el deterioro asociado a la exposición a condiciones ambientales naturales (Cisternas-Yañez, 2019).

Por ahora son pocas las referencias sobre el uso y aplicación de nanopartículas de óxido de zinc como medio de preservación de la madera para construcción, la mayor parte de los estudios se enfocan en usarlos en tintas, pinturas y recubrimientos para una extensa variedad de productos y materiales. Por lo que este estudio se enfoca en evaluar las propiedades antifúngicas de las nanopartículas de óxido de zinc aplicadas en madera de *Juniperus* sp y *Quercus* sp de la región de El Salto, Durango, partiendo del supuesto de que estas nanopartículas representan un tratamiento de preservación alternativo, ecológico y que garantiza un buen grado de protección a la madera ante el ataque de agentes bióticos y abióticos.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. General

Evaluar la acción antifúngica de las nanopartículas de óxido de zinc en madera de *Quercus* sp y *Juniperus* sp mediante el método de microcosmos terrestre.

2.1.1. Específicos

- Evaluar el grado de protección antifúngicas que ofrecen las nanopartículas de óxido de zinc a la madera de *Quercus* sp y *Juniperus* sp bajo tres niveles de concentración.
- Determinar el grado de deterioro mediante la pérdida de masa y pérdida del módulo de elasticidad dinámico (MOE_{din}).

2.2. Hipótesis de trabajo

La aplicación de nanopartículas de óxido de zinc en la madera de *Juniperus* sp. y *Quercus* sp. garantiza protección ante factores bióticos alargando su vida útil.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Madera

La madera es un conjunto de tejidos leñosos que forman el tronco, las raíces y ramas, excluida la corteza de los árboles (Capuz-Llandró, 2005); es uno de los materiales más importantes y versátiles que existen en la naturaleza, posee propiedades de aislamiento térmico y eléctrico, propiedades acústicas, una excepcional facilidad para ser trabajada, así como alta resistencia mecánica que otros materiales no reúnen simultáneamente (Fuentes-Salinas, 2002). La madera, en virtud de que su estructura química puede ser bastante variable entre especies, en la misma especie e incluso dentro de las partes de una misma planta, el nivel de resistencia al ataque de organismos biológicos es diferente, por ejemplo, la madera del duramen es más resistente que la de albura, por lo que la primera línea de acción que es económicamente viable para impedir su ataque consiste en utilizar madera con elevada resistencia natural (Da Silva-Alves et al., 2006). Esta propiedad de la madera que le confiere resistir el ataque de agentes degradadores químicos, físicos y biológicos sin el debido tratamiento de preservación se denomina resistencia natural (Paes, 2002).

3.2. Durabilidad de la madera

El término durabilidad se refiere a la capacidad de la madera para soportar el ataque de hongos, insectos, el desgaste mecánico y la influencia de los factores ambientales (Zabel y Morrell, 1992).

Esta característica depende estrechamente del entorno en el que la madera será empleada, ya sea en espacios interiores o en condiciones mucho más exigentes, como el contacto directo con el suelo o con agua salada. Cuando la madera está en contacto con el suelo, su durabilidad se entiende como la capacidad de resistir el biodeterioro

provocado por diversos microorganismos e insectos, de acuerdo con los diferentes nichos ecológicos en los que se encuentre expuesta (Mora y Encinas, 2001).

La madera, independientemente de la especie, es susceptible a la acción de los factores ambientales, los cuales influyen directamente en las deformaciones y daños que puedan presentar, siendo la radiación solar y la humedad los agentes de mayor incidencia. Como resultado de esta respuesta natural frente al entorno, se generan grietas que facilitan la absorción de humedad y crean condiciones propicias para el desarrollo de patologías, como el ataque de hongo y organismos xilófagos (Viña, 1977).

3.2.1. Durabilidad natural de la madera

La madera, al ser un material de origen orgánico, puede ser afectada por distintos organismos vivos que ocasionan su deterioro, lo que ha contribuido a que se le considere comúnmente como un material de baja durabilidad. No obstante, esta percepción es solo parcialmente acertada, ya que la resistencia de la madera depende en gran medida de las condiciones a las que se encuentran expuesta y de las medidas adoptadas para prevenir dichos procesos de degradación (Vignote et al., 2000).

La durabilidad natural de la madera se entiende como la capacidad inherente del material para resistir el ataque de organismos xilófagos sin la aplicación de tratamientos protectores. Esta característica no es uniforme, ya que presenta variaciones entre distintas especies, dentro de una misma especie y entre las diferentes partes del mismo elemento leñoso, como la albura y el duramen (Touza, 2013).

3.2.1.1. Determinación de la durabilidad natural de la madera

La durabilidad natural de la madera puede evaluarse mediante ensayos de laboratorio y pruebas de campo. Estas últimas, especialmente la exposición al suelo, se

consideran métodos definitivos debido a la alta actividad biológica del ambiente, aunque requieren largos periodos para obtener resultados confiables y condiciones específicas del terreno. Por su parte, las pruebas de laboratorio o aceleradas permiten obtener resultados en menor tiempo, mediante la inoculación de la madera con hongos bajo condiciones controladas, comparándola con especies patrón. Dado su origen orgánico, la madera es susceptible a la degradación biológica, siendo los hongos xilófagos los principales agentes responsables de la descomposición de sus componentes estructurales (Ramos-León et al., 2016).

3.2.1.2. Pruebas aceleradas en laboratorio

Los ensayos de laboratorio para evaluar la durabilidad o resistencia natural de la madera permiten obtener, en un periodo relativamente de tres a seis meses, información sobre la eficacia de productos preservantes o el comportamiento de cepas fúngicas específicas. Estos estudios requieren un estricto control de las técnicas y condiciones experimentales, como la sepsia y la regulación de variables clave (temperatura, humedad relativa y ventilación), además de trabajar con muestras reducidas. El resultado principal de estos ensayos corresponde al porcentaje de pérdida de peso ocasionado por el ataque de organismos xilófagos, a partir del cual es posible clasificar la durabilidad natural de las maderas mediante índices (Lomelí y Fuentes, 2002).

3.2.1.3. Índice de durabilidad natural

El índice de durabilidad constituye una herramienta fundamental para clasificar las especies de madera según su nivel de resistencia frente al deterioro. Este índice permite distinguir entre distintos grados de durabilidad, facilitando la evaluación comparativa entre especies y el diseño de estrategias para su uso en ambientes específicos. Uno de los métodos más reconocidos y utilizados para determinar el índice de durabilidad es el propuesto por Findlay. Este método clasifica la durabilidad natural de la madera en cuatro categorías, basándose en la capacidad que presentan

las diferentes especies para resistir el biodeterioro. Para establecer la categoría correspondiente, se consideran aspectos como las condiciones de uso de la madera y la pérdida de masa que esta presenta durante un periodo de cuatro meses de exposición en ensayos de laboratorio. De esta manera, el índice de durabilidad permite identificar, de manera objetiva, las especies que muestran mayor o menor resistencia ante el ataque de organismos xilófagos.

3.2.2. Pérdida de masa

La pérdida de masa de la madera suele calcularse con base en su peso seco al horno; sin embargo, el secado a temperaturas elevadas cercanas a los 100°C puede provocar alteraciones en la pared celular, lo que a su vez influye en la susceptibilidad del material al ataque microbiano. A pesar de ello, este parámetro ha sido ampliamente empleado como un indicador para evaluar la durabilidad relativa de distintas especies maderables (Sena-Mosquera, 2020).

3.3. Agentes degradadores de madera

La madera ha sido uno de los materiales más relevantes en el desarrollo de la humanidad debido a su versatilidad y amplia gama de aplicaciones. Sin embargo, su carácter orgánico la hace susceptible a diversos procesos de deterioro ocasionados por agentes bióticos y abióticos. Entre los agentes bióticos se encuentran insectos, hongos, bacterias, algas y xilófagos marinos, los cuales representan los principales responsables del proceso de degradación. Por su parte, los factores abióticos incluyen la acción de la lluvia, el viento, la radiación solar y las condiciones de uso a las que se expone el material (Trevisan et al., 2008).

Dentro de los organismos degradadores, los insectos y los hongos destacan por su elevada capacidad de causar daños significativos tanto en la madera en rollo como en productos elaborados, generando alteraciones estructurales de gran importancia (Vignote y Martínez, 2005). Estos procesos de degradación pueden manifestarse a través de distintos mecanismos, entre los que se incluyen el desgaste mecánico, así

como la degradación física, química y biológica, por lo que resulta fundamental identificar la causa principal del deterioro para implementar medidas de control eficaces (Berrocal-Jiménez, 2006).

Uno de los efectos más relevantes del deterioro biológico es la pudrición, la cual provoca modificaciones en las propiedades físicas de la madera y una disminución considerable de su resistencia mecánica, incluso cuando el nivel de ataque es leve. Asimismo, este fenómeno afecta negativamente la apariencia del material, lo que conlleva a su rechazo en los procesos industriales (Vignote et al., 2000).

3.3.1. Desgaste mecánico

La madera expuesta a distintos tipos de movimiento puede sufrir procesos de deterioro asociados al desgaste mecánico, el cual, en ciertos casos, es suficiente para inutilizar el material. Con frecuencia, este tipo de desgaste actúa de manera conjunta con la pudrición, intensificando el daño. Asimismo, en algunas situaciones el desgaste mecánico puede ser erróneamente interpretado como pudrición de origen fúngico (De Souza y Da Silva, 1998).

3.3.2. Degradación física

El fuego se reconoce como uno de los agentes físicos más severos de destrucción de la madera, ya que, a diferencia de los procesos de deterioro más lentos provocados por hongos, insectos y organismos marinos, su acción es rápida y altamente destructiva, ocasionando daños significativos en bosques, áreas de almacenamiento y estructuras de madera (Núñez-Retana et al., 2024).

3.3.3. Insectos

De acuerdo con Viña (1997), los insectos xilófagos constituyen uno de los agentes de deterioro que ocasionan con mayor rapidez daños irreversibles en la estructura anatómica de la madera. Estos insectos actúan perforando el material para alimentarse

de la celulosa y de otros componentes propios de la madera, así como de sustancias añadidas, como la casina presente en algunos adhesivos. Generalmente, su ataque se concentra en la albura de las maderas duras; sin embargo, este comportamiento no puede considerarse una regla general para todas las especies, ya que una infestación severa puede provocar la destrucción total del material.

3.3.4. Hongos

Los hongos de pudrición son organismos de estructura simple que, al carecer de clorofila, no pueden realizar la fotosíntesis y, por lo tanto, dependen de otros organismos para obtener energía, ya sea mediante una relación parasitaria o a través de la descomposición de materia orgánica muerta (Touza, 2013). En este sentido, diversas especies de hongos se han especializado en utilizar la madera de árboles muertos como fuente de alimento, provocando distintos tipos de deterioro, que pueden manifestarse como cambios de coloración ocasionados por hongos cromógenos o como procesos de pudrición generados por hongos específicos de este tipo (Díaz-Moreno et al., 2009).

El deterioro fúngico de la madera puede presentarse de múltiples formas, desde la simple aparición de manchas hasta la descomposición total del material, siendo en todos los casos responsable de importantes pérdidas económicas (Kollman y Coté, 1968). Tras la muerte del árbol, los hongos encuentran condiciones favorables para su desarrollo y son capaces de degradar progresivamente los componentes de la pared celular, lo que conduce, con el tiempo, a la desaparición del material leñoso (Touza, 2013).

El desarrollo y actividad de la mayoría de los hongos xilófagos se ve favorecido por condiciones ambientales específicas, particularmente temperaturas entre 25 y 35 °C y contenidos de humedad superiores al 20%, aunque el ataque puede ocurrir en rangos más amplios de temperatura, aproximadamente de 0 a 40 °C, dependiendo de la especie fúngica (De Souza y Da Silva, 1988). Asimismo, la incidencia de mohos, manchas y procesos de degradación asociados a hongos está estrechamente

relacionada con prácticas inadecuadas de almacenamiento, manejo deficiente de la materia prima y la ausencia de medidas preventivas durante el uso final de los productos de madera, además de las condiciones de temperatura y humedad del entorno (Forest Products Laboratory, 1999).

De manera general, la madera puede verse afectada por agentes de deterioro tanto abióticos como bióticos. Los primeros incluyen factores climáticos, mecánicos, químicos y térmicos que alteran su apariencia, estructura anatómica y composición química, generando desde decoloraciones superficiales hasta daños severos que inutilizando completamente el material (Tsoumis, 1991). Por su parte, los agentes bióticos comprenden bacterias, algas, xilófagos marinos, hongos e insectos, siendo estos dos últimos los principales responsables de los procesos de degradación de la madera (De Souza y Da Silva, 1988).

3.3.4.1. Pudrición parda o cúbica

De acuerdo con De Souza y Da Silva (1988), la pudrición parda corresponde a un proceso de origen biológico derivado de la acción enzimática del micelio de los hongos xilófagos sobre las paredes celulares de la madera. Estos organismos degradan principalmente la celulosa y hemicelulosa, transformándolas en compuestos solubles fácilmente asimilables.

Asimismo, Vignote et al. (2000), señalan que este proceso es producido por hongos que se alimentan de la pared celular, razón por la cual se denomina también pudrición cubica, caracterizado por la pérdida de material que fracciona el tronco en piezas de forma paralelepípedica. En este sentido, los hongos de pudrición parda degradan preferentemente la celulosa y la hemicelulosa de la pared celular, afectando principalmente los estratos menos lignificados de la pared secundaria, mientras que la laminilla media presenta mayor resistencia debido a su alto contenido de lignina (Luley, 2006).

La madera afectada por este tipo de hongos adquiere una coloración parda y presenta un patrón característico de agrietamiento en forma de cubos, rasgo distintivo que da

origen a su denominación. Este tipo de hongos es común en madera utilizada bajo cubierta, las cuales son responsables de la mayoría de los ataques registrados en estructuras de madera destinadas a la construcción (Touza, 2013).

3.3.4.2. Pudrición blanca o fibrosa

La pudrición blanca es ocasionada por hongos que degradan principalmente la lignina de la pared celular, lo que confiere a la madera una coloración blanquecina y un aspecto fibroso; no obstante, estos organismos también pueden afectar la celulosa en menor grado (Vignote et al., 2000; Touza, 2013). Su acción se desarrolla sobre la superficie de la pared celular mediante procesos enzimáticos que generan fisuras progresivas, conduciendo a un deterioro lento pero generalizado del material (De Souza y Da Silva, 1988).

3.3.4.3. Pudrición blanda

La pudrición blanca es provocada por hongos imperfectos pertenecientes a los ascomicetos, los cuales penetran la pared secundaria de las células y avanzan gradualmente entre los tejidos, produciendo grietas superficiales características. Este proceso de degradación ocurre de forma relativamente lenta, incluso en condiciones de alta humedad, y se manifiesta principalmente como un reblandecimiento superficial del material (Touza, 2013).

3.4. Tratamientos con nanotecnología

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

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

Cuando se utilizan estos materiales en un tratamiento de recubrimiento, la liberación lenta y controlada del ingrediente activo es importante debido a su efecto duradero y su mínimo impacto ambiental (Papadopoulos et al., 2019). En ese sentido, la incorporación de nanopartículas de base biológica podría mejorar significativamente el rendimiento de los compuestos existentes en los mercados tradicionales y fomentar el desarrollo de nuevos tipos de biocompuestos y mercados (Pacheco-Torgal et al., 2019)

3.4.1. Antecedentes de tratamientos con nanotecnología

Núñez-Retana et al. (2024), evaluaron las ventajas e inconvenientes de los tratamientos disponibles para la protección de la madera. Para ello, se dividió en dos secciones: los agentes degradadores de la madera, y una clasificación de tecnologías de protección que incluye tanto métodos tradicionales, como enfoques novedosos, tal es el caso de la nanotecnología. En conclusión, diversos tratamientos químicos tradicionales reducen, sustancialmente, el daño biológico y la absorción de humedad de la madera. Por otra parte, si se emplean compuestos nanométricos para la protección de la madera es una técnica prometedora y en creciente desarrollo.

Días-Cruz (2022) evaluó las propiedades físicas, mecánicas, térmicas, colorimétricas, de pudrición y al ataque de termitas en muestras de madera de *Pinus elliottii* tratadas con nanopartículas de óxidos de cobre y zinc. Se aplicaron los óxidos en 50 muestras de 5 x 2.5 x 1.5 (radial x tangencial x longitudinal), impregnando 10 muestras por cada tratamiento con el método de vacío-presión. Se monitorearon en un microcosmo

terrestre por un tiempo de 6 meses, de ahí, se guardaron en cajas Petri 16 semanas expuestos directamente a hongos xilófagos. Como resultado, los óxidos no alteraron significativamente las propiedades físicas y mecánicas de la madera, provocaron oscurecimiento y disminución térmica, mantuvo la resistencia al ataque de termitas, inhibiendo la pérdida de masa. En cuanto a resistencia, el óxido de cobre fue el tratamiento más eficiente contra hongos xilófagos.

Ponce-Herrero (2018) estimó la capacidad antifúngica de tres diferentes tratamientos; nano plata, oligómeros de quitosano y propóleo en madera de *Populus* sp. El método utilizado se basó en la norma EN:113. Las muestras de madera fueron impregnadas mediante autoclave con cuatro concentraciones diferentes de los tres productos, mientras que su efecto fue evaluado in vitro expuesto al hongo *T. versicolor*, realizando tres muestreos, a las 4, 8 y 12 semanas. Calculando la pérdida de masa de la madera tratada y comparando con la pérdida de masa de la madera sin ningún tratamiento. Concluyendo, que la efectividad antifúngica de los tratamientos de oligómeros de quitosano y propóleo se pierde con el tiempo, debido a su carácter biodegradable, mientras que el tratamiento con nanopartículas de plata protege a la madera con un grado de protección a largo plazo.

Alfieri et al. (2017), formularon nanosistemas ignífugos, hidrorrepelentes y protectores contra el biodeterioro en nano plata, nano oxido de cobre, nano zinc y nano sílice para madera. Se realizó la impregnación por inmersión y se analizó la capacidad de interacción, dado que estos nanocompuestos tienen la capacidad de cargarse según el pH del medio, las soluciones se formularon con los dos perfiles de pH=3 y pH=8. Los resultados indicaron que todos los sistemas formulados generaron una buena protección contra los hongos y redujeron significativamente la absorción de agua.

Cisternas-Yáñez (2019) evaluó los costos y tiempos del escalamiento de un nuevo preservante para madera elaborado con biomateriales como quitosano y lignina más nanopartículas de cobre, boro y sílice. Para ello, se impregnaron probetas de madera, realizando ensayos de termitas, caracterización microscópica y termogravimetría. Obteniendo que el preservante desarrollado es efectivo ante las termitas y

presentando mejor resistencia térmica, sin embargo su alto costo no lo hace competitivo con otros preservantes.

3.5. Módulo de elasticidad

La tecnología de la madera desempeña un papel fundamental en la identificación y evaluación de los procesos de deterioro de este material, ya que se centra en el análisis de sus propiedades mecánicas durante la evaluación de la degradación de la madera y permite obtener información relevante sobre la disminución de su desempeño estructural (Trevisan et al., 2007).

La rigidez se define como la capacidad de un cuerpo para oponerse a la deformación cuando es sometido a fuerzas externas, entendidas como aquellas acciones que alteran su forma, tamaño o dimensiones. En el caso de la madera, esta propiedad se cuantifica mediante el módulo de elasticidad, el cual se determina a partir de la relación entre el esfuerzo aplicado por unidad de superficie y la deformación producida por unidad de longitud (CORMA, 2005).

El módulo de elasticidad es ampliamente empleado como un indicador para evaluar la presencia y el avance de la pudrición en probetas de madera, debido a que su disminución resulta más sensible que otros métodos de ensayo. De hecho, la pérdida de este parámetro refleja de manera significativa los procesos de degradación, incluso en etapas tempranas, cuando la pérdida de masa aun es limitada (Carrillo et al., 2011).

3.6. Descripción de las especies de estudio

3.6.1. *Quercus* sp

Los encinos pertenecen al género *Quercus*, este es el más grande de la familia Fagaceae. Tiene entre 350 a 500 especies en todo el mundo y se estima entre 135 a 350 especies solo en México, de las cuales casi la mitad son endémicas (Gutiérrez-Ramos, 2017).

Árbol de 4 a 27 m, o arbusto de 0.5 a 4 m, pecíolos de 3-9 (-13) x 1-1.5 mm, láminas oblongas, oblongeoladas, u obovadas, de 3-8(-10)x(1-)2-4(-5) cm, gruesas y rígidas, planas o ligeramente convexas, patentes o algo colgantes, el margen con 1-5 aristas o dientes triangulares y aristados en cada lado, en general confinados a la mitad distal, rara vez entero; base de la lámina redondeada o cordada, ápice obtuso, por lo común termina con un diente agudo, nervaduras 5-9 en cada lado, en la haz más pálidas que la epidermis, poco elevadas, las más pequeñas poco impresas, en el envés por lo general más o menos del mismo color que la superficie, prominentes, terminan en el diente o ramificadas y anastomosadas cerca del margen en la parte basal de la lámina, márgenes revolutos, cartilaginosos, del color de las nervaduras; haz sublustrosa, verde oscuro (sin brillo y verde amarillento o verde muy pálido cuando seca), glabra al madurar excepto por la presencia de tricomas fasciculados persistentes cerca de las nervaduras en la base, rugulosa, envés con un denso tomento, blanco amarillento a café muy pálido, los pelos fasciculados, sésiles, superpuestos, cubriendo por completo la superficie ampulosa y la epidermis papilosa. Bellotas bianuales, de 10-15 mm de largo, en cúpulas de 10-13 mm de ancho, el borde erecto, solitarias o en pares, casi sésiles o con pedúnculos hasta de 8 mm de largo (García y González, 2003).

3.6.2. *Juniperus* sp

Juniperus es el segundo género de conífera más diverso en el mundo después de *Pinus*, ya que reúne 67 taxones, 28 variedades y siete formas. En México, se conocen 16 especies, los individuos colonizan lugares muy degradados y forman parte de la vegetación secundaria; son de aparición temprana y su permanencia se asocia a disturbios originados por actividades humanas (Farjon, 2005).

Su madera se aprovecha para la elaboración de muebles, artesanías, y por su resistencia a la pudrición, se usa en la manufactura de ventanas y postes. Asimismo, tiene usos medicinales, ornamentales y religiosos (German, 2006).

Arbusto arborescente hasta árbol corto, corpulento, perennifolio, monopódico, de 3 a 10 m (hasta 20 m) de altura, con un diámetro a la altura del pecho de 20 a 50 cm.

Copa ampliamente cónica o densa y globular o esparcidamente ramificada en bosques densos y en árboles viejos. Hojas por lo general opuestas, escuamiformes. Con un solo tronco principal, a veces ramificándose 1 hasta 2 m por encima de la base, tronco tortuoso, ramas rígidas, ascendentes, que se dividen en tres dimensiones. Corteza externa de estructura laminar dividida en placas cuadrangulares, o bien en estructura fibrosa. Cono masculino oval-elipsoide, subtetrágono, de 3 a 6 mm de largo, color café-amarillento, formado por 14 escamas ovadas; cono femenino formado por 6 escamas ovaladas, subgloboso a anchamente elipsoide, de 8 a 20 mm de diámetro, color moreno rojizo a café. Fruto megaestróbilo maduro subgloboso hasta ampliamente elipsoide, de 8 a 15 mm de diámetro, rojizocanela hasta rojizo-moreno, pruinoso por encima, la pulpa seca fibrosa. El fruto maduro permanece en el árbol. Semillas color chocolate morenas a color canela claro, (1) 2 a 4 (6) por megaestróbilo, ampliamente ovadas hasta angulares, de 6 a 7 mm de largo por 4 a 6 mm de ancho, hilo de hasta tres cuartos de longitud de la semilla (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], s/f).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a la región 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 1).



Figura 1. Área de estudio.

4.2. Colecta del material

La madera utilizada para el presente estudio corresponde a *Juniperus* sp. y *Quercus* sp colectada en la región de El Salto, Durango (Figura 2). En forma adicional y para cumplir los requisitos de las normas empleadas se utilizaron probetas de *Fagus sylvatica* como testigo.

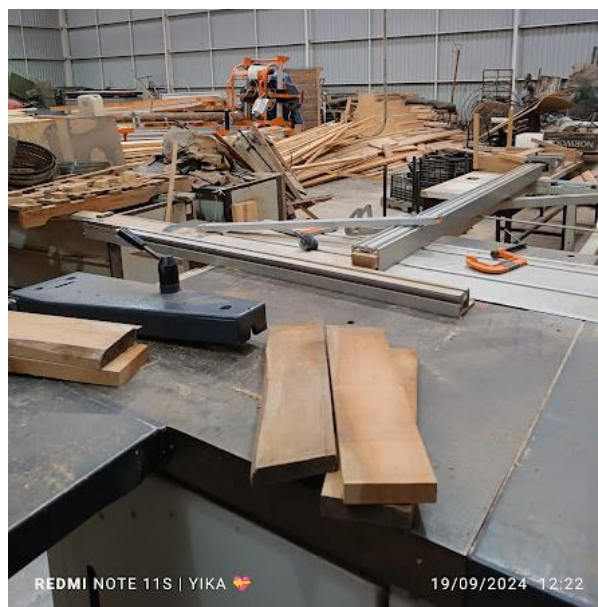


Figura 2. Colecta de material.

4.3. Síntesis de nanopartículas de óxido de zinc

La metodología utilizada para la formación de las nanopartículas fue el método sol gel, que consiste en usar como precursor acetato de zinc anhidro ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$), la producción de las nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO), se realizó mediante una reacción entre el hidróxido de sodio (NaOH) 0,1M con acetato de zinc ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) 0,5M a una temperatura controlada de 60°C - 70°C . Para la síntesis se disolvió el hidróxido de sodio en 250mL de agua desionizada a una concentración de 0,1 M. La solución resultante se trató bajo agitación constante y a una temperatura de reacción de 50°C . Después de obtener la temperatura deseada, se midió el pH de la solución y se adicionaron lentamente 25 mL (0,18mL/min) de la solución de acetato de zinc al 0.5 M (goteo durante 2 horas y 20 min) hasta llegar a un pH de 7. Este procedimiento se llevó a cabo bajo agitación magnética dando como resultado la precipitación inmediata de las nanopartículas de óxido de zinc y el color de la solución cambió de incoloro a blanco. El compuesto formado se filtró empleando papel Whattman #40, el cual se lavó varias veces con agua destilada y se sometió a un secado en estufa a una temperatura de 70°C durante 12 horas. Luego se llevó a calcinación a una temperatura

de 600°C por 3 horas. Como material emulsificante de las nanopartículas se utilizó agua (Figura 3).



Figura 3. Síntesis de nanopartículas de óxido de zinc.

4.3.1. Preparación de las probetas

La elaboración de las probetas para el ensayo de microcosmo terrestre se realizó de acuerdo con la Pre-norma Europea 807 (ENC 807, 2001), la cual consiste en elaborar primas rectangulares de 10 mm x 5 mm x 100 mm en el plano radial, tangencial y longitudinal respectivamente, teniendo un total de 80 probetas por especie (Figura 3). La durabilidad natural de la madera se cuantificó como el grado de deterioro mediante la pérdida de masa, pérdida del módulo de elasticidad dinámico (MOEdin) y pérdida del módulo de elasticidad estático (MOEst). Tanto las probetas con tratamiento y sin tratamiento, se marcaron con una clave para tener un mejor control del experimento (Figura 4).



Figura 4. Elaboración de las probetas.

4.3.2. Preparación del suelo

El suelo utilizado para el microcosmo terrestre se colectó en un área forestal natural del Instituto Tecnológico de El Salto que no presentara la aplicación de tratamientos previos (Figura 5). El sustrato utilizado fue cribado en una malla de 4 mm para que al enterrar la probeta estuviera en contacto directo con el suelo. Para llevar a cabo el experimento el suelo se mantuvo en un rango de 50 a 90% de su capacidad de retención de agua.



Figura 5. Preparación del suelo.

4.3.3. Acondicionamiento de las probetas

Previo a introducir las probetas en los recipientes con suelo, las probetas se repartieron en tres concentraciones de nanopartículas de óxido de zinc emulsificadas en un medio acuoso, teniendo 20 probetas para la concentración de 0%, 20 para la concentración 0.5%, 20 para la concentración del 1% y 20 para la concentración del 5%. Adicionalmente, se utilizaron 20 probetas como testigo que correspondió a la madera de *Fagus* sp a las que no se les aplicó ningún tratamiento de nanopartículas. La impregnación se llevó a cabo con la ayuda de una bomba de vacío durante un tiempo de 10 min para cada concentración (Figura 6).



Figura 6. Impregnación de las probetas con nanopartículas de óxido de ZnO.

Con ello, todas fueron sometidas a un proceso de secado a una temperatura de 103 ± 5 °C hasta obtener un peso constante y determinar su masa inicial (Figura 7).



Figura 7. Estufado de las probetas.

4.3.4. Distribución de las probetas

El total de las probetas fueron colocadas al azar en los recipientes de plástico que contenían el suelo cribado (Figura 8). Cada una de las probetas fue ubicada a una distancia de 2 cm de estas y se enterraron 8 cm que corresponde a un 80% de su longitud durante un periodo de 32 semanas.



Figura 8. Distribución de las probetas en el microcosmo.

4.3.5. Inspección de las probetas

Las inspecciones se realizaron en la semana 8, 16, 24 y 32 durante el desarrollo del ensayo. En cada una de estas inspecciones se extrajeron las probetas para someterlas a un proceso de secado a la misma temperatura que al inicio del experimento hasta obtener peso contante, al total de las probetas que había en el momento de la inspección se les determinó el MOE_{din} y en la semana 32 a todas se les determinó el MOE_{est} (Figura 9).

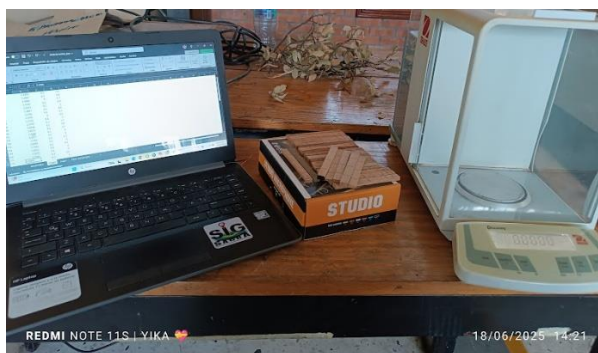


Figura 9. Inspección de las probetas en las semanas 8, 16, 24 y 32.

4.3.6. Pérdida de masa

La reducción de masa en porciento de las probetas se obtuvo por diferencia en condición seca al inicio y final del experimento:

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

Donde:

Pm = Pérdida de masa (%)

Pi = Peso seco al inicio del experimento (g)

Pf = Peso seco al final del experimento (g)

4.3.6.1. 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).

El MOE_{din} se determinó en probetas por encima del punto de saturación de la fibra, ubicadas sobre dos soportes a 0.224 veces la longitud total (22.4 mm) desde los extremos. La frecuencia de las ondas se midió induciendo vibraciones con un golpe en el centro de la probeta, capturadas mediante un micrófono y el programa Vibration program® (Figura 10).

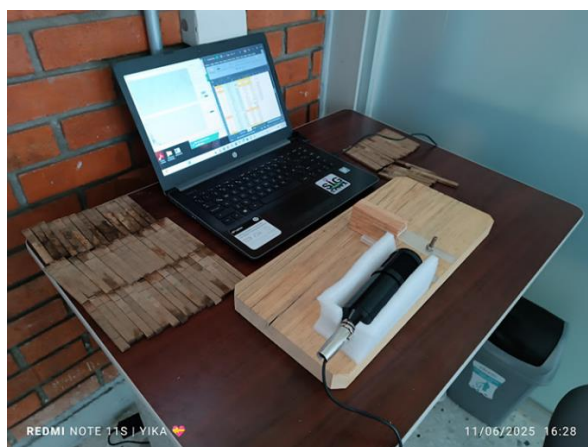


Figura 10. Adiamiento para captar las vibraciones de frecuencia en las probetas.

El cálculo se realizó mediante 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:

MOE_{din} = Módulo de elasticidad dinámico (Mpa)

f_n = 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 (mm^4)

a = grosor de la probeta (mm)

b = ancho de la probeta (mm)

4.4. Procesamiento de información

Para analizar el efecto de la pérdida de masa y del MOE_{din} de la madera tratada con las cuatro concentraciones de nanopartículas de óxido de zinc, se realizaron pruebas de normalidad de Shapiro-Wilks modificado que indicaron cuando las variables de interés provienen o no de una población con distribución normal ($p < 0.001$). Por lo que para identificar diferencias estadísticas significativas en 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. Pérdida de masa

5.1.1. Por género

La menor pérdida de masa durante las 32 semanas de exposición la mostró *Juniperus* sp. (media 10.14%; mediana 3.36%) y rango promedio más bajo (49.68; grupo A), lo que sugiere mayor resistencia relativa a la degradación en las condiciones del ensayo. La madera de la especie testigo (*Fagus* sp.) presentó valores intermedios de degradación (media 11.30%; mediana 10.21%) compartiendo grupo estadístico (A) con *Juniperus*; mientras que la madera de *Quercus* sp. exhibió la mayor pérdida de masa (media 18.50%; mediana 14.89%) y el rango promedio de la mediana más alto (86.07; grupo B) lo que evidencia una susceptibilidad significativamente mayor frente a *Juniperus* y *Fagus* (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis de varianza no paramétrica para la pérdida de masa por género.

Género	Media (%)	Medianas (%)	Promedio de rangos*	GL	H	P
<i>Juniperus</i> sp.	10.14	3.36	49.68 A			
Testigo <i>Fagus</i> sp.	11.30	10.21	63.33 A	2	26.32	<0.0001**
<i>Quercus</i> sp.	18.50	14.89	86.07 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.

La mayor durabilidad de la madera de *Juniperus* sp. se puede atribuir a que su madera presenta altas concentraciones de extractivos tóxicos (resinas, terpenos, fenoles), que inhiben eficazmente a los microorganismos descomponedores (Miyamoto et al., 2019); mientras que en *Quercus* sp. probablemente su baja durabilidad se deba al uso de albura o madera joven y una pobre cantidad de taninos protectores (Santos et al., 2025).

5.1.2. Por género y dosis de aplicación de NpsZnO

La tabla 3 muestra diferencias significativas entre género x dosis ($p < 0.0001$) y un patrón biológicamente interpretable donde la madera del género *Juniperus* muestra un mejor desempeño con dosis de $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ de NpsZnO (mediana 2.70; grupo A), mientras que dosis más altas (especialmente $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) se asociaron con mayor pérdida de masa (mediana 15.17; BCDE). En contraste, la madera de *Quercus* mantuvo pérdidas elevadas en todas las dosis y alcanzó su peor condición a $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (mediana 19.15; grupo E), lo que sugiere que la susceptibilidad intrínseca de la madera y/o la eficacia real del tratamiento (retención/distribución) fueron más determinantes que la sola presencia de ZnO.

Tabla 3. Análisis de varianza no paramétrica para la pérdida de masa por género y dosis de aplicación de nanopartículas de ZnO.

Género y Dosis de ZnO	Media (%)	Medianas (%)	Promedio de rangos*	GL	H	P
<i>Juniperus</i> 0.5 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	4.15	2.70	26.64 A	8	39.32	<0.0001**
<i>Juniperus</i> al 1($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	9.71	3.73	45.67 AB			
<i>Juniperus</i> al 0($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	9.77	3.98	51.93 ABC			
<i>Fagus</i> Testigo	11.30	10.21	63.33 BCD			
<i>Juniperus</i> al 5($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	16.54	15.17	72.73 BCDE			
<i>Quercus</i> al 0.5 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	13.36	13.03	73.60 CDE			
<i>Quercus</i> al 5($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	19.01	13.42	86.00 DE			
<i>Quercus</i> al 0($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	18.83	15.26	89.60 DE			
<i>Quercus</i> al 1($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	22.81	19.15	95.07 E			

*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.

A pesar de que las nanopartículas de ZnO pueden mejorar la resistencia al deterioro por su actividad antimicrobiana, varios estudios reportan reducción de pérdida de masa o mejor desempeño frente a hongos/condiciones de campo cuando el ZnO está bien incorporado en la madera. Sin embargo, el efecto no siempre es lineal con la concentración pues en ocasiones dosis altas pueden favorecer aglomeración, menor penetración efectiva, heterogeneidad del depósito o incluso mayor lixiviación, reduciendo la acción bioactiva disponible en el sustrato; por eso se han observado escenarios donde solo ciertas concentraciones resultan claramente protectoras,

especialmente cuando se considera el lavado/lixiviación (Reinprecht et al., 2022), lo que explique el comportamiento no reactivo de la madera de *Quercus* con las NpsOZn.

5.2. Pérdida de MOE_{din}

5.2.1. Por género

La pérdida del módulo de elasticidad (MOE_{din}) mostró diferencias significativas ($p < 0.0001$) entre los géneros evaluados, con una separación clara por rangos, donde la madera de *Quercus* sp. presentó la mayor pérdida (grupo C), seguido de *Juniperus* sp. (grupo B), mientras que el testigo (*Fagus* sp.) mostró la menor pérdida (grupo A) (Tabla 4). Este patrón sugiere que bajo el mismo esquema experimental en microcosmos terrestre (contacto con suelo, alta humedad y exposición sostenida a microorganismos), el género explica una fracción importante de la degradación mecánica de la madera.

Tabla 4. Análisis de varianza no paramétrica para la pérdida de MOE dinámico por género.

Género	Media (%)	Medianas (%)	Promedio de rangos*	GL	H	P
Testigo <i>Fagus</i> sp.	30.69	32.62	31.13 A	2	23.39	<0.0001**
<i>Juniperus</i> sp.	42.21	47.73	61.75 B			
<i>Quercus</i> sp.	52.71	53.74	82.59 C			

*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.

Desde el punto de vista mecánico, es esperable que el MOE_{din} sea un indicador sensible del deterioro biológico pues durante la degradación incipiente, la colonización fúngica y los procesos oxidativos asociados pueden generar pérdidas de rigidez incluso antes de que la pérdida de masa sea extrema, porque se comprometen componentes estructurales (principalmente polisacáridos de la pared celular) que sostienen la respuesta elástica. Esta sensibilidad del MOE_{din} frente a ataques iniciales está ampliamente documentada y se ha propuesto como métrica rápida para detectar deterioro temprano (Wilcox, 1978).

5.2.2. Por género y dosis de aplicación de NpsZnO

La combinación del género con la dosis de aplicación de NpsZnO mostró un efecto significativo sobre la pérdida de MOE_{din} en microcosmos terrestre ($p < 0.0001$). Donde la menor pérdida de MOE_{din} lo exhibió la madera *Quercus* con dosis de $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ que al parecer se asocia con una reducción del deterioro mecánico; mientras que el peor desempeño corresponde a la madera del mismo género (*Quercus* sp.) que no fue tratada con NpsZnO. Por lo que se refiere a *Juniperus* sp., también presentó altas pérdidas de MOE_{din} en todas las dosis (Tabla 5).

Tabla 5. Análisis de varianza no paramétrica para la pérdida del MOE dinámico por género y dosis de aplicación de nanopartículas de ZnO.

Especie y dosis de ZnO	Media (%)	Medianas (%)	Promedio rangos*	GL	H	P
<i>Quercus</i> al $5(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	24.38	23.67	21.73 A			
<i>Fagus</i> Testigo	30.69	32.62	31.13 A			
<i>Quercus</i> al $1(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	31.09	26.40	37.47 AB			
<i>Juniperus</i> al $0.5(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	46.75	49.86	65.00 BC			
<i>Juniperus</i> al $0(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	51.85	55.67	85.13 CD	8	71.41	<0.0001**
<i>Quercus</i> al $0.5(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	53.74	55.65	85.33 CD			
<i>Juniperus</i> al $1(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	55.00	52.57	85.73 CD			
<i>Juniperus</i> al $5(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	56.86	57.69	93.33 D			
<i>Quercus</i> al $0(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	59.65	60.46	102.47 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.

Lo anterior sugiere que la protección de las NpsZnO en la madera de *Quercus*, la dosis alta ($5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) se asocia con una menor reducción de pérdida de MOE_{din}; en *Juniperus*, el mejor comportamiento está entre dosis intermedia ($0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), por lo que protección de las NpsZnO a la pérdida del MOE_{din} probablemente se deba a la cantidad de ZnO que queda realmente disponible y fijado en la madera (Reinprecht et al., 2022).

5.3. Clasificación de la durabilidad de la madera tratada con NpsZnO

De acuerdo con los valores del índice “x”, las muestras de madera de *Juniperus* tratadas con dosis de $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ($x=0.42$), alcanzaron la clasificación de moderadamente

durable, mientras que la madera sin ZnO es poco durable ($x=0.86$), y con dosis de 1 y 5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ se clasifica como no durable ($x=2.33$ y 1.70), sugiriendo que dosis altas no garantizan protección al deterioro. Por su parte la madera de *Quercus* se clasifica como de baja durabilidad general: no durable a 0 y 1 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($x=1.13$ y 1.70) y solo mejora a poco durable con 0.5 y 5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($x=0.70$ y 0.83) (Tabla 6).

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

Género y dosis de aplicación ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Índice “x”	Clasificación
<i>Juniperus</i> dosis 0	0.86	Poco durable
<i>Juniperus</i> dosis 0.5	0.42	Moderadamente durable
<i>Juniperus</i> dosis 1	2.33	No durable
<i>Juniperus</i> dosis 5	1.70	No durable
<i>Quercus</i> dosis 0	1.13	No durable
<i>Quercus</i> dosis 0.5	0.70	Poco durable
<i>Quercus</i> dosis 1	1.70	No durable
<i>Quercus</i> dosis 5	0.83	Poco durable

El patrón de aplicación de dosis intermedias es coherente con la literatura donde la eficacia de tratamientos con nanomateriales depende fuertemente de la dispersión, retención y accesibilidad del ingrediente activo en la madera (Alfredsen et al., 2021).

5.4. Comportamiento general de la pérdida de masa durante el periodo de evaluación

5.4.1. Para la madera de *Juniperus* sp.

En términos generales, la pérdida de masa en la madera de *Juniperus* mostró una tendencia creciente conforme avanzó el tiempo de evaluación (de 8 a 32 semanas). En la mayoría de los tratamientos el incremento fue más marcado en las etapas iniciales y/o finales, mientras que en los periodos intermedios aumentó de manera gradual junto al comportamiento del tratamiento testigo (*Fagus* sp). En conjunto, el patrón refleja una acumulación progresiva de degradación a lo largo del tiempo bajo las condiciones del microcosmos terrestre (Figura 11).

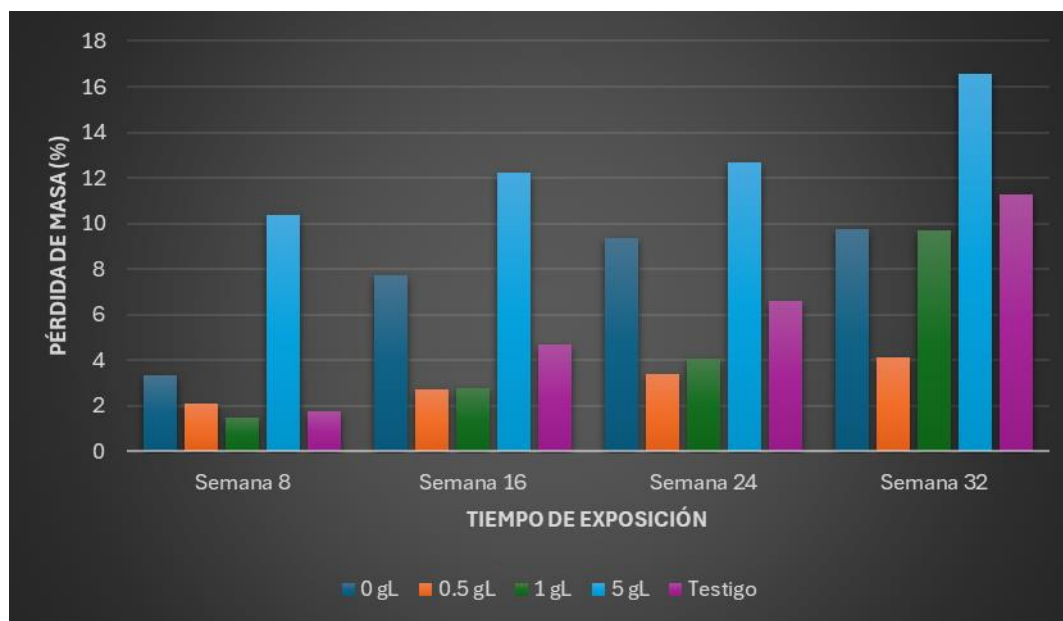


Figura 11. Pérdida de masa para la madera de *Juniperus* sp y el testigo por dosis de NpsZnO.

Brischke y Wegener (2019) señalan que la eficacia del ingrediente activo en el tratamiento de la madera no siempre aumenta linealmente con la dosis porque influyen tanto la retención, la distribución y lixiviación de ese ingrediente; así que para disminuir la lixiviación de nanocompuestos se recomienda el uso de emulsiones, lo cual en este estudio no fue utilizado.

5.4.2. Para la madera de *Quercus* sp.

En general, la pérdida de masa de la madera de *Quercus* sp aumentó de forma progresiva con el tiempo en todos los tratamientos evaluados lo cual era esperado dado a las condiciones de contacto con el suelo y la alta disponibilidad de inóculo microbiano para permitir una colonización fúngica y bacteriana, donde la dosis de NpsZnO de 0.5 g·L⁻¹ mostró el mejor desempeño con una menor pérdida de masa en todas las evaluaciones que a la semana 32, implica 29% menos pérdida de masa respecto a la dosis de 0 g·L⁻¹ (18.83%). Este patrón sugiere un efecto protector consistente, compatible con reportes donde nano-ZnO puede incrementar la resistencia al ataque biológico cuando logra una distribución/retención adecuada en la madera. Las dosis de 1 y 5 g·L⁻¹ alcanzaron el valor más alto de la pérdida de masa

incluso por encima de la dosis de $0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. El testigo mostró pérdidas de masa más bajas con respecto a la madera de *Quercus* (hasta 11.3% en la semana 32). Esta diferencia puede reflejar variación de densidad, extractivos y anatomía entre maderas, además del efecto del tratamiento (Figura 12).

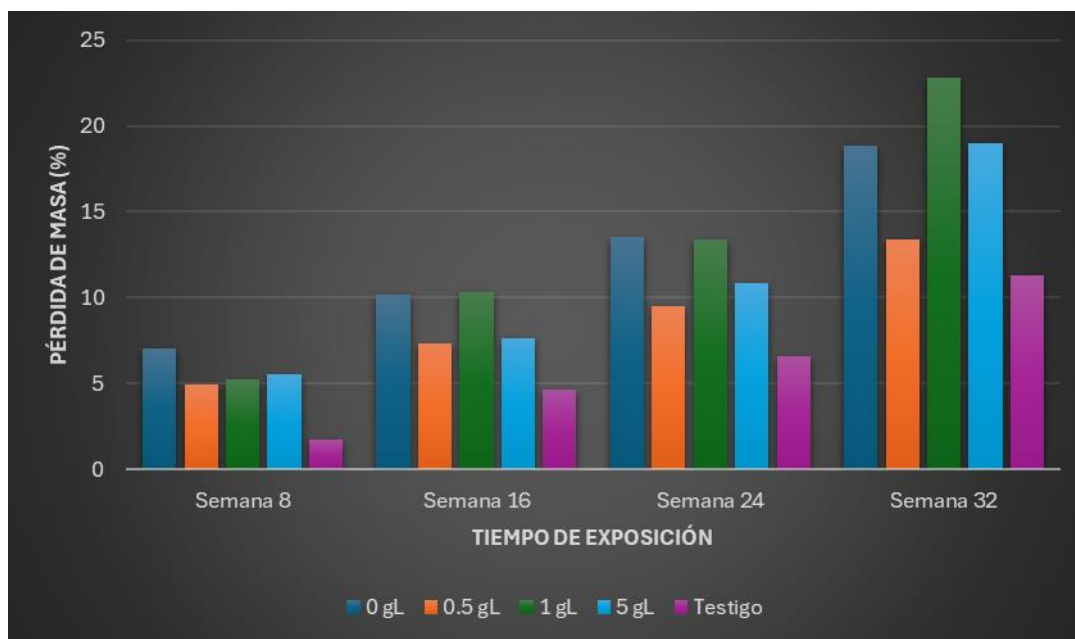


Figura 12. Pérdida de masa para la madera de *Quercus* sp y el testigo por dosis de NpsZnO.

Este comportamiento puede indicar que un incremento en la dosis de NpsZnO no necesariamente puede traducirse en una mayor eficacia en la protección ya que pueden ocurrir fenómenos como aglomeración de nanopartículas, penetración heterogénea o cambios en los niveles de retención y lixiviación; además, en preservantes particulados la resistencia al lavado y la permanencia del ingrediente activo en el sustrato son críticas para sostener el efecto en el tiempo. Con lo que se intensifica conforme avanza la exposición (Clausen et al., 2011).

5.5. Comportamiento general de la pérdida de MOE_{din} durante el periodo de evaluación

5.5.1. Para la madera de *Juniperus* sp.

La pérdida de MOE_{din} en *Juniperus* sp durante las 32 semanas de exposición aumentó en todos los tratamientos, pasando de pérdidas moderadas en semana 8 (8.33 a 18.82%) a pérdidas severas en la semana 32 (46.75 a 56.86%). Los resultados de las dosis aplicadas de NpsZnO muestran una respuesta definida sobre a mayor dosis, mayor protección, destacando la dosis de 0.5 g·L⁻¹. La madera testigo (*Fagus* sp) mostró pérdidas de MOE_{din} consistentemente menores que *Juniperus*, culminando en 30.69% en la semana 32 (Figura 13). Esto sugiere que, bajo estas condiciones particulares del microcosmos, *Fagus* mantuvo mejor su rigidez relativa quizás motivada por variaciones anatómicas y químicas entre géneros (densidad, composición y accesibilidad de carbohidratos, y patrón de colonización), además de que el testigo cumple el rol de referencia comparativa en la evaluación de durabilidad.

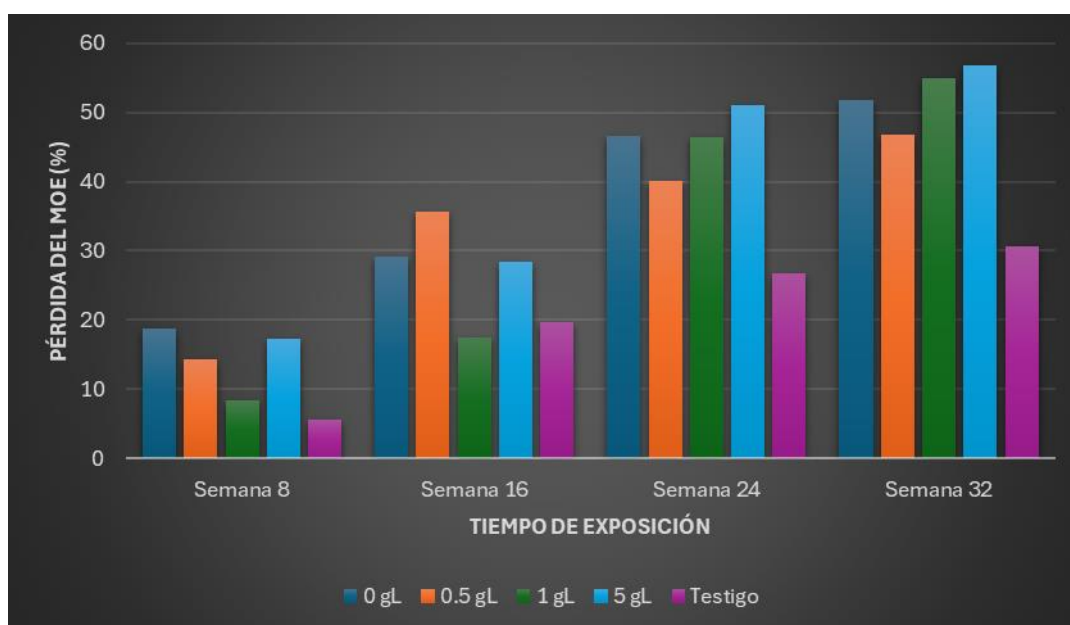


Figura 13. Pérdida de MOE dinámico para la madera de *Juniperus* sp y el testigo por dosis de NpsZnO.

Este tipo de no linealidad es compatible con fenómenos bien descritos en preservación nanoestructurada donde la eficacia depende menos de la cantidad nominal y más de la dispersión, penetración/retención, interacción con la pared celular y resistencia al lixiviado (especialmente en ambientes húmedos como microcosmos). A dosis altas puede incrementarse la aglomeración y la heterogeneidad, reduciendo el contacto efectivo con los agentes biológicos y/o favoreciendo pérdidas por lavado, lo que debilita el efecto con el tiempo (Zabel y Morrell, 2012).

5.5.2. Para la madera de *Quercus* sp.

Durante las 32 semanas de exposición en microcosmos terrestre, la madera de *Quercus* sp mostró una pérdida progresiva de MOE_{din} en todos los tratamientos de NpsZnO, con un patrón claramente dependiente del tiempo, donde los valores aumentan desde la semana 8 hasta la 32, lo cual es consistente con la evolución esperada de la degradación biológica en condiciones de humedad y edáficas, propias de una actividad microbiana. Al comparar las dosis, se aprecia un gradiente de protección atribuible al ZnO donde la dosis de aplicación de $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ fue el tratamiento más efectivo durante todo el periodo (12.53 a 24.38%), con la pérdida final más baja; esto apunta a un efecto dosis–respuesta donde concentraciones mayores logran una protección más estable. Mientras que el testigo (madera de referencia) mostró el valor más bajo en la semana 8 (5.59%), pero posteriormente aumentó hasta 30.69% (semana 32). En la fase final, el testigo queda muy cercano al tratamiento $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (31.09%) y por encima de $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (24.38%). Este patrón puede interpretarse como que, bajo las condiciones específicas del microcosmos, el tratamiento con $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ no solo mitigó el deterioro en *Quercus* frente al control sin ZnO, sino que incluso mantuvo la rigidez relativa por debajo del nivel de pérdida observado en la referencia hacia el final del ensayo (Figura 14).

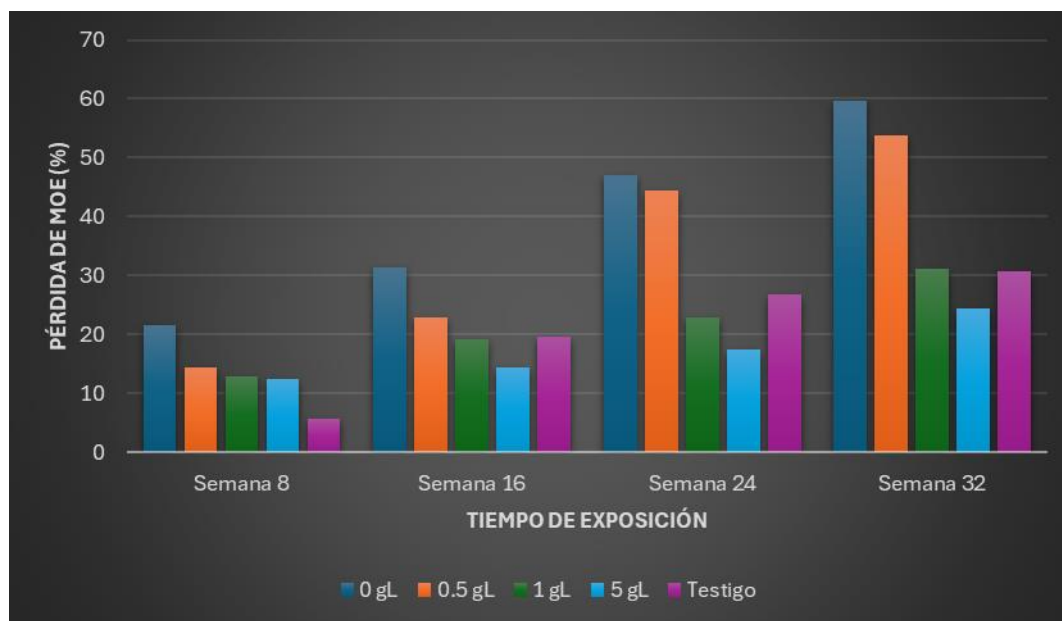


Figura 14. Pérdida de MOE dinámico para la madera de *Quercus* sp y el testigo por dosis de NpsZnO. Estos resultados son congruentes con los trabajos que se han realizado utilizando nanomateriales en tratamientos de preservación en maderas; aunque enfatizan que la eficacia final depende de la retención, la exposición y la interacción con humedad y agentes biológicos (Clausen et al., 2010; Jasmani et al., 2020).

De acuerdo a los resultados anteriores, se tiene evidencia para rechazar la hipótesis de trabajo planteada en este trabajo donde se establece que la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc en la madera de *Juniperus* sp. y *Quercus* sp. garantiza protección ante factores bióticos alargando su vida útil, ya que el efecto del ZnO no fue universal ni consistente entre dosis ni entre variables de respuesta, y por tanto no puede garantizarse un nivel de protección adecuado a la madera de estas especies.

6. CONCLUSIONES

- El microcosmos terrestre generó deterioro progresivo en ambas maderas durante 32 semanas, reflejado en incrementos acumulativos de pérdida de masa y especialmente, de pérdida de MOE_{din} , confirmando que la rigidez dinámica es un indicador sensible del daño mecánico por biodeterioro.
- La madera de *Juniperus* sp. mostró menor pérdida de masa que la de *Quercus* con un comportamiento cercano a la del testigo *Fagus* sp.
- La madera de *Quercus* sp. presentó una mayor pérdida de masa y MOE_{din} , indicando mayor vulnerabilidad en las condiciones del ensayo.
- El efecto de las nanopartículas de ZnO no fue consistente, por lo que la dosis óptima no fue la misma para todos los casos.
- En *Juniperus*, la dosis $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ fue la más favorable para reducir la pérdida de masa, pero en dosis altas (1.0 y $5.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) no garantizaron una mejora y se asociaron con clasificaciones de baja durabilidad (índice “x”).
- En *Quercus*, la dosis $5.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ fue la más efectiva para reducir la pérdida de MOE_{din} , mostrando el mejor desempeño mecánico relativo frente al control sin tratamiento.
- La clasificación de durabilidad “x”, confirmó que las NPsZnO no aseguran por sí mismas una mejora sostenida en la durabilidad de la madera.
- La aplicación de NPsZnO muestran potencial como tratamiento alternativo, pero su uso debe replantearse como una estrategia condicionada a encontrar una mejor optimización de la dosis por especie, evaluar las retención, distribución y estabilidad en la madera antes de recomendarlas como un preservante.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alfieri, P. V., Canosa, G., y Guidice, C. A. (2017). Uso de nanopartículas para la protección contra el deterioro de madera patrimonial. [Presentación] *5° Congreso Iberoamericano y XIII Jornada Técnica de Restauración y Conservación del Patrimonio "Dr. Arq. Osvaldo Otero"*. Buenos Aires, Argentina. <http://hdl.handle.net/20.500.12272/3381>
- Alfredsen, G., Brischke, C., Marais, B. N., Stein, R. F., Zimmer, K., & Humar, M. (2021). Modelling the material resistance of wood-Part 1: Utilizing durability test data based on different reference wood species. *Forests*, 12(5), 558.
- Berrocal-Jiménez, A. (2006). Clasificación de daños producidos por agentes de biodeterioro en la madera. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 4 (10): 54-62.
- Bi, W., Li, h., Hui, D., Haitao, L., Lorenzo, R., Corbi, I., Corbi, O., Gaff, M., y Ashraf, M. (2021). Effects of chemical modification and nanotechnology on wood properties. *Nanotechnology Reviews*, 10 (1): 978-1008. DOI: <https://doi.org/10.1515/ntrev-2021-0065>
- Brischke, C., & Wegener, F. L. (2019). Impact of water holding capacity and moisture content of soil substrates on the moisture content of wood in terrestrial microcosms. *Forests*, 10(6), 485.
- Cádenas-Paba, D. y Polanco-Tapia, C. (2007). Durabilidad natural de la madera de *Trichosperdum colombianum* (Algodoncillo). *Colombia Forestal*, 8 (17): 120-129. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2004.1.a09>
- Capuz-Llandró, R. (2005). *Materiales orgánicos maderas*. Editorial de la UPV.
- Carrillo, A., Hapla, F., Mai, C., y Garza, F. (2011). Durabilidad de la madera de *Prosopis laevigata* y efecto de sus extractos en hongos que degradan la madera. *Revista Madera y Bosques*, 17(1): 7-21.

- Chen, C. J., Kuang, Y., Zhu, S., Burgert, I., Keplinger, T., Gong, A., Li, T., Berglund, L., Eichhorn, S. J. y Hu, L. B. (2020). Structure-property-function relationships of natural and engineered wood. *Nature Reviews Materials*, 5: 642-666. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0195-z>
- Cisternas-Yáñez, D. A. (2019). Evaluación del escalamiento para producción de preservante de madera con nanopartículas. [Tesis profesional]. Universidad del Bío-Bío. <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/3535>
- 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.
- Clausen, C. A., Kartal, S. N., Arango, R. A., & Green III, F. (2011). The role of particle size of particulate nano-zinc oxide wood preservatives on termite mortality and leach resistance. *Nanoscale research letters*, 6(1), 427.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (s/f). *Juniperus deppeana* Steud. (1841). (Fam. Cupresaceas). Fichas Técnicas elaboradas por el Sistema Nacional de Información Forestal.
- Corporación Nacional de la Madera (CORMA). (2005). *Manual La Construcción de Viviendas en Maderas*.
- Da Silva-Alves, M.V., Da Costa, A.F., da Silva-Espig, D., y Do Vale, A.T. (2006). Resistência natural de seis espécies de madeiras da região amazônica a fungos apodrecedores, em ensaios de laboratório. *Ciência Florestal*, 16 (1): 17-26. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050981884>
- De Souza, A., y Da Silva, M.V. (1988). *A degradação da madeira e sua preservação. Ministério de agricultura*. Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal. Departamento de Pesquisa. Laboratorio de Productos Florestais.
- 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>

- Días-Cruz, N. (2022). *Síntese verde de cobre e zinco para preservacao da madeira de Pinus elliottii* [Tesis profesional]. Universidade Federal de Pelotas. <https://repositorio.ufpel.edu.br/handle/prefix/9123>
- Díaz-Moreno, R., Valenzuela, R., Marmolejo, J. G. y Aguirre-Acosta, E. (2009). Hongos degradadores de la madera en el estado de Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 80 (1): 13-22.
- Farjon, A. (2005). A monograph of Cupressaceae and Sciadopitys. Real Jardín Botánico, Kew, 648 págs.
- Forest Products Laboratory (1999). *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material*. Madison WI, EE UU.
- Fuentes-Salinas, M., Espinoza-López, G. y García-Díaz, S. E. (2002). Efecividad de siete productos antimanchas contra *Ceratocytis* sp. en madera de *Hevea brasiliensis* Muell Arg. (Hule). *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 8 (2): 153-159.
- García, A.A. y González, E.M.S. (2003). *Pináceas de Durango 2a. ed.* México, DF, México. Comisión Nacional Forestal-Instituto de Ecología A.C.
- Gerardin, P. (2016). New alternatives for wood preservation base don termal and chemical modification of wood. *Annals of Forest Science*, 73, 559-570. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0531-4>
- German, R. T. (2006). *Las plantas medicinales y las ciencias: una visión multidisciplinaria, capitulo: Los principales grupos de vegetales*. https://delfin.cicimar.ipn.mx/Biblioteca/Busqueda/Libro/4141?Origen=coleccion_libros
- Jasmani, L., Rusli, R., Khadiran, T., Jalil, R. Y Adnan, S. (2020). Application of Nanotechnology in Wood-Based Products Industry. *Review. Nanoscale Research Letters*, 15 (1): 5-31. DOI: 10.1186/s11671-020-03438-2
- Kollman, F. y Cote, W.W. (1968). *Principles of Wood science and technology. I Solid Wood*. Berlim, Springer-Verlag.

- Lomelí, R. M. G. y Fuentes, T. M. J. (2002). Resistencia natural de la madera de *Casuarina equisetifolia* y *Mangifera indica* contra hongos de pudrición. In: *Memoria de resúmenes de ponencias del IV Congreso Mexicano de Tecnología de Productos Forestales*. Chapingo: Universidad Autónoma de Chapingo.
- Luley, C.J. (2006). Identificación del tipo de pudrición de la madera y hongos xilófagos en árboles urbanos. La página hispana de la Sociedad Internacional de Arboricultura. Disponible en: (<http://www.isahispana.com/treecare/articles/decay-fungi.aspx>). Consultado el 05 de enero de 2026.
- Miyamoto, B. T., Konkler, M. J., Leavengood, S., Morrell, J. J., & Sinha, A. (2019). Durability assessment of western juniper from five different growing regions. *Wood and Fiber Science*, 51(1), 88-95.
- Mora, N. y Encinas, O. (2001). Evaluación de la durabilidad natural e inducida de *Pterocarpus acapulcensis*, *Tabebuia serratifolia* y *Pinus caribea* en condiciones de laboratorio. *Revista Forestal Venezolana*, 45 (1): 23-31.
- Núñez-Retana, V. D., González-Tagle, M. A., González-Rodríguez, H., Yáñez-Díaz, M. I. y Himmelsbach, W. (2024). Métodos destacados para la protección de la madera. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15 (84): 156-175. DOI: 10.29298/rmcf.v15i84.1441
- Pacheco-Torgal, F., Diamanti, M. V., Nazari, A., Granqvist, C. G., Pruna, A. and Amirkhanian. S. (2019). *Nanotechnology in eco-efficient Construction: Materials, processes and applications*. Elsevier. Duxford, Cambs., United Kingdom.
- Paes, J.B. (2002). Resistência natural da madeira de *Corymbia maculata* (Hook.) KD Hill & LAS Johnson a fungos e cupins xilófagos, em condições de laboratório. *Revista Árvore*, 26 (6): 761-767. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622002000600012>
- Papadopoulos, A. N., Bikiaris, D. N., Mitropoulos, A. C. y Kyzas, G. Z. (2019). Nanomaterials and chemical modifications for enhanced key wood properties. *Nanomaterials*, 9 (4): 607. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano9040607>

- Peraza, S. F. (2002). *Protección preventiva de la madera*. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera, AITIM. Madrid, España. 437 p.
- Ponce-Herrero, L. (2018). *Evaluación de la acción fungicida de nanopartículas de plata, oligómeros de quitosano y propóleo frente a la pudrición blanca (Trametes versicolor (L.) Lloyd), sobre madera de Populus sp. tratada mediante autoclave*. [Tesis maestría]. Universidad de Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/32149>
- Ramos-León, H. M., Trujillo-Cuellar, F., Guzmán-Loayza, D. y Araujo-Flores, M. (2016). Durabilidad natural de la madera de pino chuncho (*Shizolobium amazinicum* Huber. Ex Ducke) a la acción de dos hongos de pudrición. *Revista Forestal del Perú*, 31 (2): 81-89. DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/rfp.v31i2.1029>
- Reinprecht, L., Repák, M., Iždinský, J., & Vidholdová, Z. (2022). Decay resistance of nano-zinc oxide and PEG 6000, and thermally modified wood. *Forests*, 13(5), 731.
- Santos, S. M., de Troya, M. T., Robertson, L., Gutiérrez, S., Caballé, G., & Villanueva, J. L. (2025). Study on the Natural Durability of *Quercus pyrenaica* Willd. to Wood Decay Fungi and Subterranean Termites. *Forests*, 16(9), 1486.
- Sena-Mosquera, Y. B., Torres-Torres, J. J. y Asprilla-Palacios, Y. Y. (2020). Durabilidad natural de la madera de *Ochroma pyramidale* Urb. en el municipio de Atrato, Colombia. *Ciencias Agrícolas*, 16 (1): 192-202. DOI: <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.6105>
- Teng, T. J., Arip, M. N. M., Sudesh, A., Nemoikina, A. y Lee, H.L. (2018). Conventional technology and nanotechnology in Wood preservation. *BioResources*, 13 (4): 9220-9252. DOI: 10.15376/biores.13.4.Teng
- Touza, V. (2013). *Guía de la madera*. Madrid. Confemadera Hábitat.
- Trevisan, H., Marques, F. M., Geraldo, A. y Acosta, R. C. (2007). Avaliacao de propriedades físicas e mecánicas da madeira de cinco especies florestais em funcao da deterioracao em dois ambientes. *Revista Arbore*, 31 (1): 93-101.

- Trevisan, H., Marques, F.M.T., & de Carvalho, A.G. (2008). Degradação natural de toras de cinco espécies florestais em dois ambientes. *Floresta*, 38 (1): 33-41.
- Tsoumis, G.T. (1991). *Science and technology of wood: structure, properties, utilization*. New York, N.Y. Van Nostrand Reinhold.
- Vignote, S. y Martínez, I. (2005). *Tecnología de la madera*. España: Mundi-Prensa. Tercera edición.
- Vignote, S., Jimenez, F., Morales, E. y Gomez, C. (2000). *Tecnología de la madera en la construcción arquitectónica*. España: Mundi-Prensa.
- Viña, F. J. (1997). *La madera como material de expresión plástica. Análisis estructural y tratamiento en escultura para interior y exterior* [Tesis doctoral]. Universidad de La Laguna, España.
- Wilcox, W. W. (1978). Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength. *Wood and fiber science*, 252-257.
- Zabel, R. A., & Morrell, J. J. (2012). *Wood microbiology: decay and its prevention*. Academic press.