

La aplicación de la microscopía óptica para la identificación de hongos causantes de biodeterioro en edificaciones con valor patrimonial

The application of optical microscopy for the identification of fungi causing bio-deterioration in heritage buildings

Dawa Méndez-Alvarez¹, Kenia García-Baltodano²,
David Porras-Alfaro³, William Rivera-Méndez⁴

Méndez-Alvarez, D; García-Baltodano, K; Porras-Alfaro, D;
Rivera-Méndez, W. La aplicación de la microscopía óptica para la identificación de hongos causantes de biodeterioro en edificaciones con valor patrimonial. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° especial. Octubre, 2025. Escuela de Arquitectura y Urbanismo. TEC. Pág. 96-111.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i7.8293>

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 damendez@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-7586-5485>

2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 kgarcia@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-2507-8627>

3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 dporras@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-8917-1652>

4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 wirivera@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-2065-6264>



Palabras clave

Estudio patológico; técnicas no invasivas; madera; ascomicetos; Costa Rica.

Resumen

El uso de técnicas no invasivas para el estudio patológico de edificaciones constituye un avance importante para la conservación del patrimonio construido. El trabajo interdisciplinario para realizar este tipo de estudios ha permitido que el aporte de diversas disciplinas científicas, enriquezcan el trabajo que tradicionalmente se ha hecho en conservación por arquitectos o ingenieros. Este artículo pretende evidenciar cómo la microscopía óptica, técnica tradicionalmente ligada a las ciencias biológicas, constituye una poderosa herramienta para el estudio patológico, permitiendo realizar diagnósticos más certeros sobre el estado de conservación de los inmuebles. Para ello, se presentan tres casos de estudio donde la aplicación de la microscopía óptica permitió la identificación de hongos causantes de biodeterioro de edificaciones de valor patrimonial en tres ciudades de Costa Rica con condiciones climáticas diferentes. Como principal resultado destaca el hallazgo de 42 géneros de hongos, la mayoría ascomicetos, cinco de los cuales son reiterativos en los edificios estudiados.

Keywords

Pathological study; noninvasive technique; wood; ascomycetes; Costa Rica.

Abstract

The employment of non-invasive techniques for the pathological study of buildings is an important advance for the conservation of the built heritage. The collaborative effort encompassing multiple scientific disciplines has enhanced the scope of the research, complementing, and expanding upon the contributions traditionally made by architects and engineers. This article aims to demonstrate how optical microscopy, a technique traditionally linked to biological sciences, is a powerful tool for pathological studies, allowing more accurate diagnoses of the state of conservation of buildings. To illustrate this point, three case studies are presented, each highlighting the application of optical microscopy in identifying fungi responsible for biodeterioration in heritage buildings across three cities with distinct climates in Costa Rica. The principal result of this study is the identification of 42 genera of fungi, predominantly ascomycetes, five of which were repeatedly observed in the studied buildings.

Introducción

La madera es un material ampliamente utilizado en la construcción, siendo común en diferentes países y contextos, aunque su uso y configuración a nivel arquitectónico responde a una relación directa con el territorio y la cultura de cada lugar. Si bien se trata de un material que presenta excelentes propiedades que lo hacen óptimo para la construcción, puede ser susceptible a lesiones físicas, mecánicas y químicas [1]. En algunos casos estos daños son provocados por la presencia de agentes de biodeterioro como los hongos, los cuales pueden acelerar los procesos de deterioro generando alteraciones estéticas e incluso problemas estructurales [2].

El estudio de las lesiones y los agentes de biodeterioro, constituye parte de la patología de la construcción [3]. La evolución de la tecnología ha permitido que el empleo de diversas técnicas de carácter no invasivo [4] [5] faciliten tanto la identificación de agentes como el diagnóstico oportuno para brindar soluciones orientadas a la conservación de los materiales.

En el caso de las edificaciones de madera el uso de técnicas no invasivas como la microscopía óptica permite la identificación de agentes de una forma segura, que no genera daños a los materiales [6] pues para su análisis se requieren muestras muy pequeñas, obtenidas en sitio a través de raspados o hisopados, que posteriormente son estudiadas a partir de procesos de laboratorio. Esta técnica ha demostrado su eficiencia en especial para la identificación y caracterización tanto de los géneros y especies de hongos, como de los tipos de pudrición que estos generan [7], siendo un factor determinante para la definición de los tratamientos requeridos para su control.

El presente artículo tiene como finalidad exponer el uso de la microscopía óptica como técnica no invasiva para determinar los tipos de agentes biológicos que afectan la madera utilizada en edificaciones; siendo especialmente útil en inmuebles patrimoniales en los cuales el estudio patológico requiere ser preciso y con mínima intervención. Para ello, se exponen los análisis realizados en estudio de tres inmuebles de valor patrimonial ubicados en Costa Rica.

La madera fue un material ampliamente utilizado en el país para la edificación especialmente entre finales del siglo XIX y principios del XX, muy asociado a la importación de edificaciones de estilo victoriano en el Valle Central y a los modelos prefabricados que introdujo en sus enclaves bananeros y mineros la United Fruit Company y las empresas ligadas a esta. La popularización del uso de la madera aserrada [8], así como la adaptación y criollización de la estética y el sistema constructivo de los primeros modelos importados, dio lugar a lenguajes arquitectónicos particulares que responden claramente a su contexto a partir de estrategias bioclimáticas y expresiones estéticas propias. De esta forma, lugares como San José, Limón [9] o Puntarenas [10], actualmente preservan ejemplos representativos de edificaciones de madera de dicha época.

Si bien la construcción en madera se ha reducido de forma drástica en el país [39], aún se conserva una cantidad significativa de este tipo de inmuebles. Algunos de ellos, debido a su antigüedad e importancia histórica han sido protegidos a través de la figura de patrimonio histórico-arquitectónico (Ley N° 7555 de la República de Costa Rica), mientras que otras, a pesar de no estar protegidas, son conservadas como parte de su reconocimiento como inmuebles con valores patrimoniales.

Materiales y métodos

Objeto de estudio

Para esta aportación se seleccionaron tres casos de estudio, analizados previamente como parte de proyectos de investigación del Instituto Tecnológico de Costa Rica [11] [12] [13] realizados por equipos interdisciplinares de arquitectos, ingenieros forestales y biotecnólogos; en los cuales se estudiaron características arquitectónicas y de biodeterioro en diferentes contextos del país. Si bien dichos proyectos contemplan una amplia diversidad de inmuebles, para este artículo además del aspecto ya mencionado, se establecieron como criterios para la escogencia de los inmuebles a analizar los siguientes: uso de la madera como material constructivo en estructura o cerramientos, importancia patrimonial dentro de su contexto, construcción cercana a los 100 años de antigüedad, estado de conservación y las condiciones climáticas a las que están expuestos según su ubicación.

El primer caso de estudio es la Casa Misionera de la Iglesia Bautista, ubicada en Puerto Limón (9.996475151194977, -83.03126558663071) (figura 1). Esta ciudad se encuentra en la costa Caribe del país, presenta una temperatura media anual de 25,9°C, una precipitación media anual de 287,3 mm y una humedad relativa de 86% [14].

Su construcción, posiblemente entre 1887 y 1888, está ligada a la incorporación de la comunidad afrodescendiente en la ciudad. El inmueble cuenta con dos niveles y presenta características propias de la arquitectura caribeña costarricense como: galerías, amplios aleros, antealeros, calados, monitor, petatillo, techos con grandes pendientes y pilotes (figura 2a).

Esta edificación fue declarada patrimonio histórico arquitectónico en 2002 a través del Decreto Ejecutivo 30232-C, publicado en el periódico oficial La Gaceta N° 65. A pesar de que fue restaurada en 2002, en la actualidad este inmueble se encuentra desocupado y cuenta con daños importantes producto de la falta de mantenimiento y el abandono, por lo que presenta mal estado de conservación y un riesgo importante de desaparición.

El segundo inmueble es la Escuela El Carmen, ubicada en la ciudad de Puntarenas (9.97645407394108, -84.84605363398005) (figura 1). Puntarenas presenta una temperatura media anual de 26,9°C, una precipitación media anual de 113,5 mm y una humedad relativa de 76,7%, además se encuentra en la costa pacífica del país [15].

Este edificio forma parte de la arquitectura vernácula de la ciudad, con características como: zócalo, uso de petatillo en la parte superior, ventanas y pendientes pronunciadas. La edificación cuenta con tres volúmenes de un nivel con una configuración en C con patio central (figura 2b). Aunque el edificio actualmente se encuentra en funcionamiento presenta daños y lesiones importantes, que evidencian un estado regular de conservación. Esta escuela pública a lo largo de los años ha mantenido el uso educativo, primero como escuela de primaria, luego como colegio universitario y en la actualidad, nuevamente utilizada para la enseñanza de niños en edad escolar.

La tercera edificación es conocida como la Casa del Subcomandante, forma parte del Conjunto Edificatorio del Museo Nacional de Costa Rica, ubicada en San José, Valle Central (9.933061278383478, -84.07178388898778) (figura 1). Esta ciudad presenta una temperatura media anual de 21,1°C, una precipitación media anual de 145,8 mm y una humedad relativa de 76,2% [16].

Este edificio fue construido a finales del siglo XIX y, aunque no cuenta con una declaratoria patrimonial específica para el inmueble, es parte de uno de los conjuntos de mayor relevancia cultural y representatividad para el país. La Casa del Subcomandante hoy en día es un espacio destinado a exposiciones temporales, esto después de una importante restauración realizada en el año 2008.

Originalmente este inmueble fue utilizado como vivienda para el segundo comandante del Cuartel Bellavista, el espacio militar más importante de San José construido durante la dictadura de Federico Tinoco [17]. La Casa del Subcomandante es un inmueble de carácter ecléctico con paredes de ladrillo, pisos y cielos de madera, puertas con madera y vidrio y baldosa hidráulica (figura 2c).

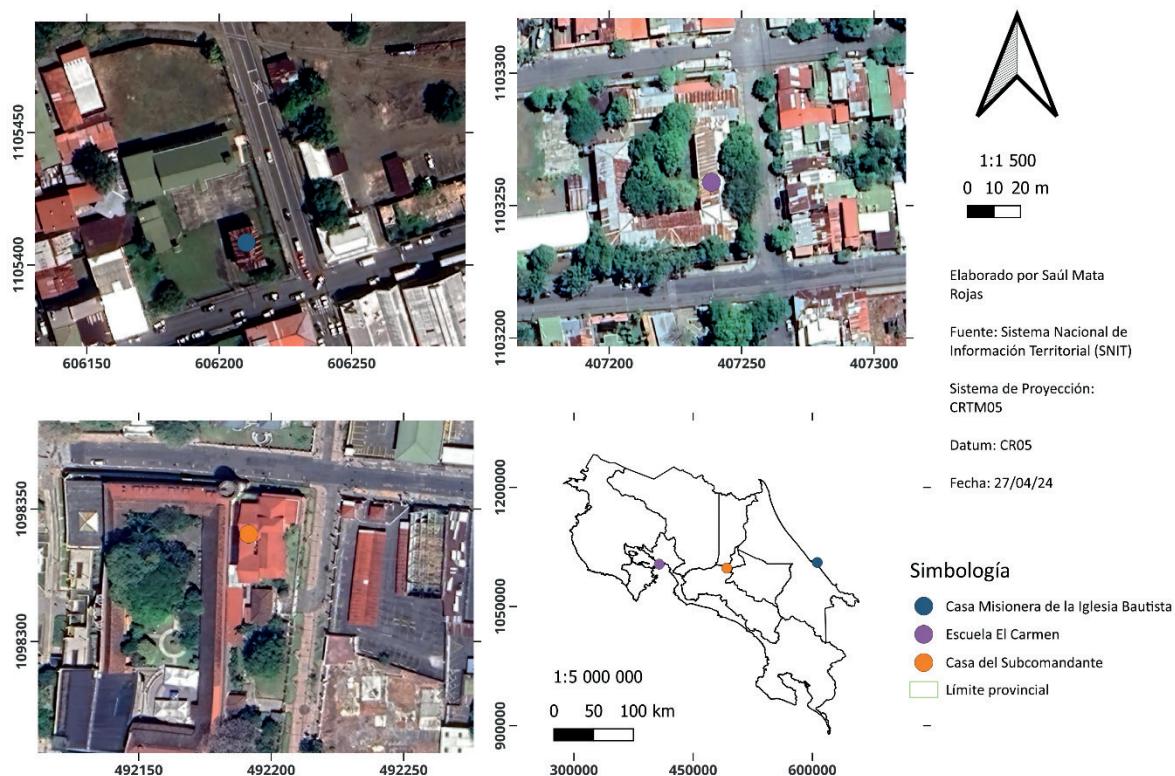


Figura 1. Ubicación de cada sitio seleccionado para el estudio.



Figura 2. Edificaciones utilizadas como casos de estudio.

En cada uno de los inmuebles estudiados se realizó un levantamiento arquitectónico que, posteriormente, permitió desarrollar planos de cada edificación. En el caso de la Escuela El Carmen y la Casa Misionera de la Iglesia Bautista, se contaba con algunos planos elaborados de cierta antigüedad que se conservaban en el Centro de Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural (actual Dirección de Patrimonio Cultural) del Ministerio de Cultura y Juventud, por lo que se realizó la rectificación de medidas a través de medidores láser, identificándose algunas diferencias significativas entre los planos y las edificaciones, por lo que se optó por dibujarlos nuevamente.

Levantamiento de lesiones y toma de muestras biológicas

En cada uno de los inmuebles seleccionados se realizó un recorrido donde se localizaron los daños o lesiones presentes, estos se documentaron a través de fotografías y se ubicaron en planos arquitectónicos. La información obtenida posteriormente se trasladó a una base de datos de elaboración propia que sistematiza la información obtenida en campo para cada caso.

Los daños se clasificaron según [18] por su origen en: lesiones químicas (resultado de la reacción de los materiales a la acción del medio ambiente y los procesos bioquímicos); lesiones físicas (relacionadas directamente con la acción de fenómenos como lluvia, viento, humedad, cambios de temperatura); y lesiones mecánicas (aquellas que comprometen la estabilidad de los elementos estructurales). En cuanto a las lesiones de tipo orgánicas se tomó una muestra de aproximadamente 1g siguiendo el procedimiento de [19] y se almacenaron a 4°C en el laboratorio de patología forestal de la Escuela de Ingeniería Forestal del TEC hasta su posterior uso (cuadro 1).

Cuadro 1. Número de muestras y fecha de colecta según inmueble.

Inmueble	Número total de muestras	Fecha de colecta	Interior o exterior del inmueble	Elemento constructivo
Casa Misionera de la Iglesia Bautista, Limón	7	Mayo 2019	Exterior e interior	Cielos, pisos, paredes, columnas, gradas
Escuela El Carmen, Puntarenas	14	Diciembre 2023	Exterior	Paredes
Casa del Subcomandante, MNCR, San José	3	Marzo 2021	Interior	Piso y paredes

Aislamiento e identificación morfológica de agentes de deterioro

Las muestras se subdividieron en dos partes iguales, una de ellas se utilizó para realizar el aislamiento en diferentes medios de cultivo como lo mencionan [19], con un periodo de incubación de 8 días a 25°C. En cada aislamiento se observó la placa y se re-aisló los morfotipos de hongos más frecuentes hasta obtener cultivos axénicos por medio de transferencia de hifas. Con estos cultivos se procedió a realizar la identificación morfológica por medio de microscopía óptica. En cada muestra se realizó un montaje, con azul de lactofenol, y se observó las estructuras a un aumento de 40X, donde se tomaron varias fotografías para determinar el género y la especie.

Identificación especies de maderas

En los recorridos dentro y fuera de los inmuebles, Casa Misionera de la Iglesia Bautista y la Escuela El Carmen, con ayuda de un taxónomo experto en anatomía de la madera se realizó un raspado en diferentes piezas de madera para cada cerramiento y se observó la anatomía de cada pieza para lograr la identificación taxonómica [20] [21]. Para la Casa del Subcomandante, dentro del Museo Nacional de Costa Rica, el arquitecto Ronald Quesada Chaves, funcionario a cargo de la conservación del inmueble, brindó la información correspondiente a la especie de madera utilizada en el proceso de restauración.

Resultados

Con el levantamiento arquitectónico de cada inmueble se logró determinar qué partes de la edificación se ven más afectadas y qué tipo de lesión predomina en cada sitio. Como se observa en la figura 3, la Casa Misionera de la Iglesia Bautista presenta los tres tipos de lesión; sin embargo, predominan las lesiones de tipo físicas, tanto en sus fachadas como en el interior por la alta humedad de la ciudad, y las lesiones de tipo mecánicas por falta de mantenimiento.

Según la identificación de madera, dentro de la Casa Misionera de la Iglesia Bautista se encuentra madera de *Dalbergia retusa* (cocobolo) y *Pinus sp.* (pino) como piezas originales del inmueble. Además, se identificaron piezas de *Cedrela odorata* (cedro) y *Cordia alliodora* (laurel) utilizadas para sustitución de elementos originales durante el proceso de intervención [20].

En la Escuela El Carmen, se localizaron lesiones de los tres tipos, sin embargo, predominan las físicas como se observa en la figura 4. Además, las lesiones se ubican en la fachada de la escuela, donde el material, en este caso la madera, está en mayor contacto con las condiciones climáticas como la lluvia, el viento y el sol, generando una afectación más evidente en su exterior que en su interior. En cuanto a la identificación de la madera presente, se determinó el uso de *Cedrela odorata* (cedro) y *Pochota fendleri* (pochote) como piezas originales y *Cordia alliodora* (laurel) como piezas de sustitución [21].

En cuanto a la Casa del Subcomandante, solo se observaron lesiones de tipo químicas y físicas (figura 5), donde en algunos puntos dentro del inmueble se identificó que al existir una lesión física por humedad esta contribuía al desarrollo de una lesión de tipo química. Este inmueble tuvo una intervención en 2008 donde se sustituyó la mayoría de las piezas de madera, por lo que al momento del estudio la madera dentro la Casa del Subcomandante se identificó como *Pochota fendleri* (Pochote).

Con la observación de las estructuras morfológicas a nivel macro y microscópico de los aislamientos se logró determinar 14 géneros de hongos en la Casa Misionera de la Iglesia Bautista, 19 géneros en la Escuela El Carmen y nueve géneros en la Casa del Subcomandante dentro del Museo Nacional de Costa Rica, para un total de 42 géneros donde cinco de ellos se comparten en los edificios. Entre los géneros identificados se encuentran *Aspergillus*, *Penicillium* y *Trichoderma*, entre otros (cuadro 2).

La mayoría de ellos sin importar el inmueble se clasifican como ascomicetos, los cuales se encuentran presentes en el ambiente y en algunos casos son capaces de causar daños a lo interno de la madera. Asimismo, se determinó la presencia de agentes de deterioro de la madera como *Coprinellus radians* que causa pudrición blanca y *Sclerotinia spp.* que causa pudrición marrón (cuadro 2).

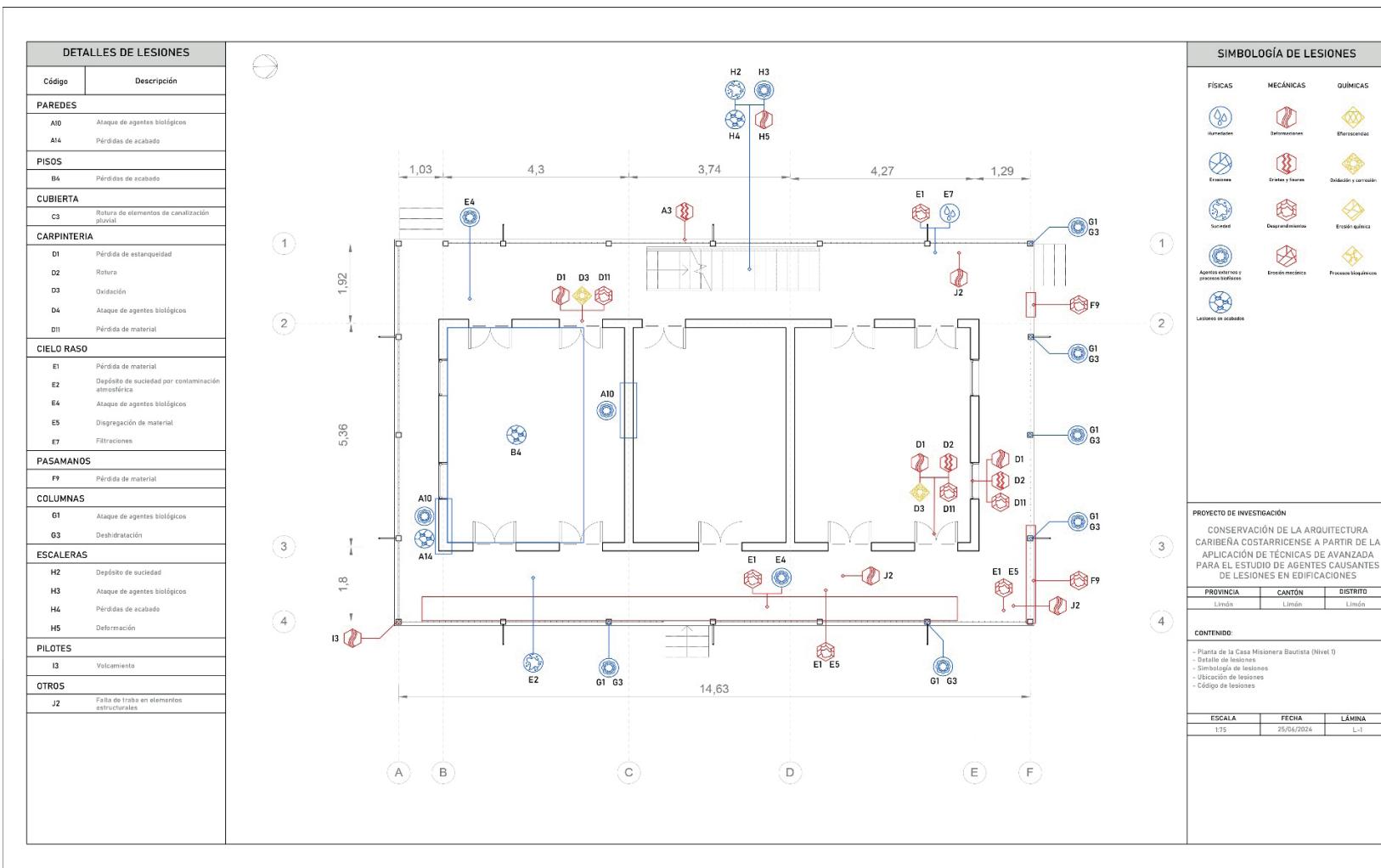


Figura 3. Plano con ubicación de lesiones del primer nivel de la Casa Misionera de la Iglesia Bautista, Limón, Costa Rica.

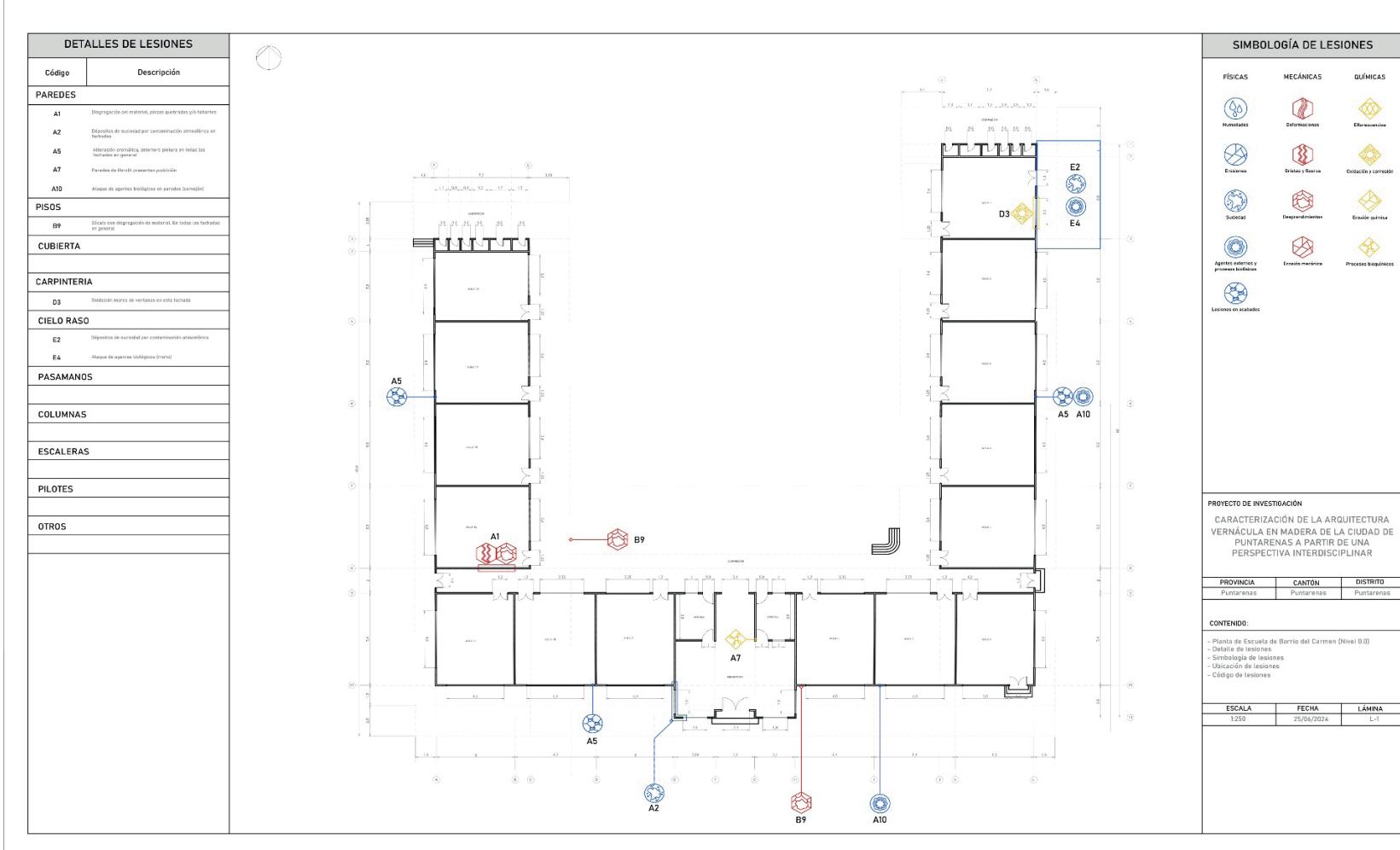


Figura 4. Plano con ubicación de lesiones de la Escuela El Carmen, Puntarenas, Costa Rica.

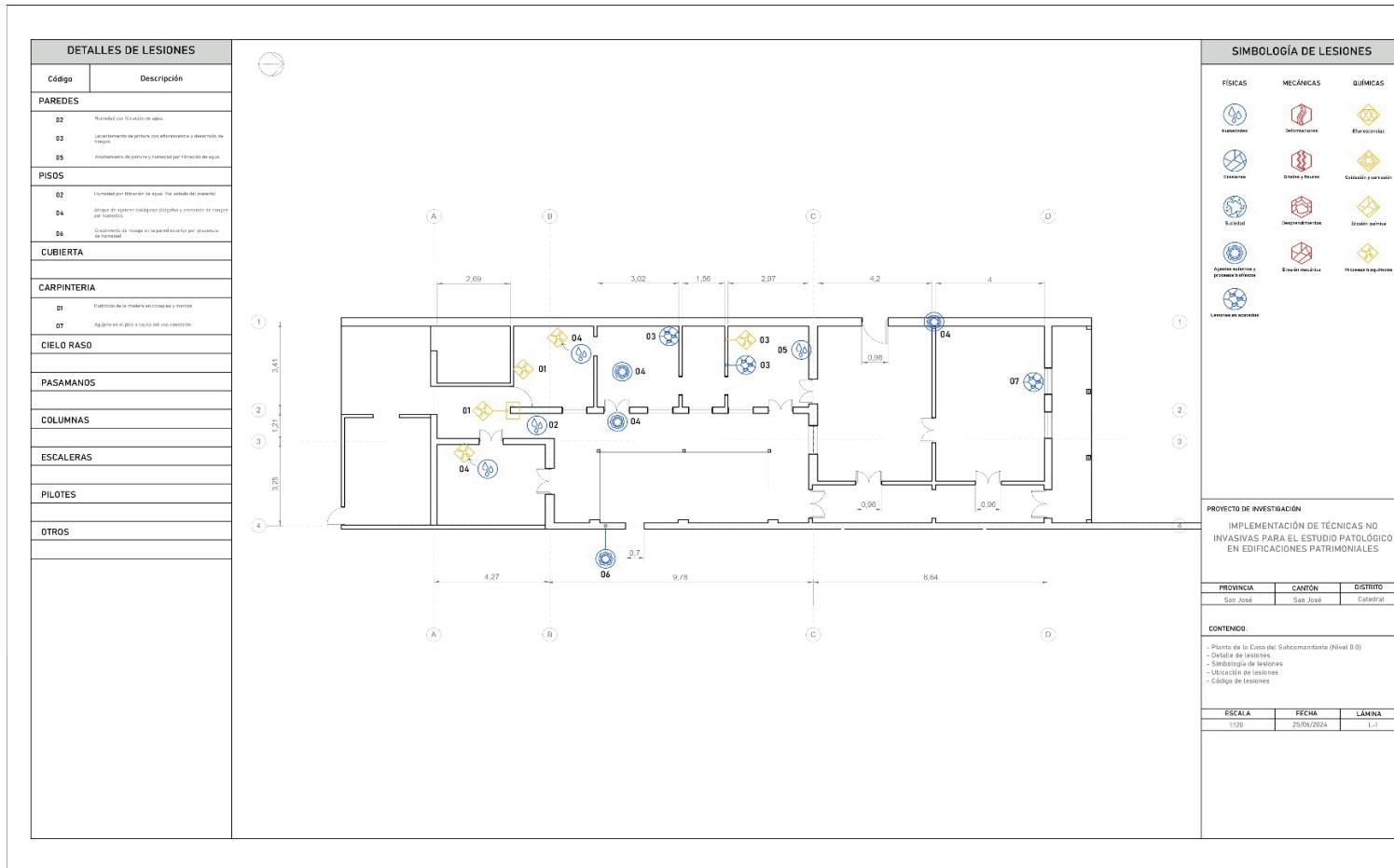


Figura 5. Plano con ubicación de lesiones de la Casa del Subcomandante dentro del Complejo edificatorio del Museo Nacional de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Cuadro 2. Géneros y especies de hongos identificados por observación microscópica, aislados a partir de muestras de madera presentes en edificación con valor patrimonial.

Casa Misionera de la Iglesia Bautista, Limón	Escuela El Carmen, Puntarenas	Casa del Subcomandante, MNCR, San José
<i>Aspergillus niger</i>	<i>Aspergillus niger</i>	<i>Aspergillus niger</i>
<i>Coprinellus radians</i>		<i>Alternaria</i> spp.
	<i>Aureobasidium</i> spp.	
	<i>Chaetomium</i> spp.	
	<i>Cladosporium</i> spp.	<i>Cladosporium</i> spp.
	<i>Dactylaria</i> spp.	
	<i>Donkioporia</i> spp.	
	<i>Epicoccum</i> spp.	
<i>Fusarium solani</i>		<i>Gloeophyllum</i> spp.
<i>Hypoxyylon polyporus</i>		
<i>Lasiodiplodia theobromae</i>	<i>Lasiodiplodia theobromae</i>	<i>Lasiodiplodia theobromae</i>
	<i>Microsporum</i> spp.	
<i>Mucor</i> spp.	<i>Mucor</i> spp.	<i>Mucor</i> spp.
<i>Mycosphaerella</i> spp.		
	<i>Paecilomyces</i> spp.	
<i>Penicillium citrinum</i>		
<i>Penicillium</i> spp.	<i>Penicillium</i> spp.	<i>Penicillium</i> spp.
<i>Phaeoisaria</i> spp.		
	<i>Phlebiopsis</i> spp.	
	<i>Phytophthora</i> spp.	
<i>Pseudoidriella</i> spp.		
	<i>Pythium</i> spp.	
	<i>Rhizoctonia</i> spp.	
	<i>Rhizopus</i> spp.	
		<i>Sclerotinia</i> spp.
<i>Talaromyces cnidii</i>		
<i>Toxicocladosporium</i> spp.		
<i>Trichoderma</i> spp.	<i>Trichoderma</i> spp.	<i>Trichoderma</i> spp.
	<i>Verticillium</i> spp.	

En ciertos aislamientos al promover la esporulación del hongo se logró observar conidias o conidiosporos en los montajes, como se observa en la figura 6. Además, se realizaron comparaciones con la literatura para obtener la especie del hongo, tal es el caso de los hongos: *Lasiodiplodia theobromae*, *Aspergillus niger*, *Penicillium citrinum*, *Coprinellus radians*, *Trichoderma* spp. y *Fusarium solani*.

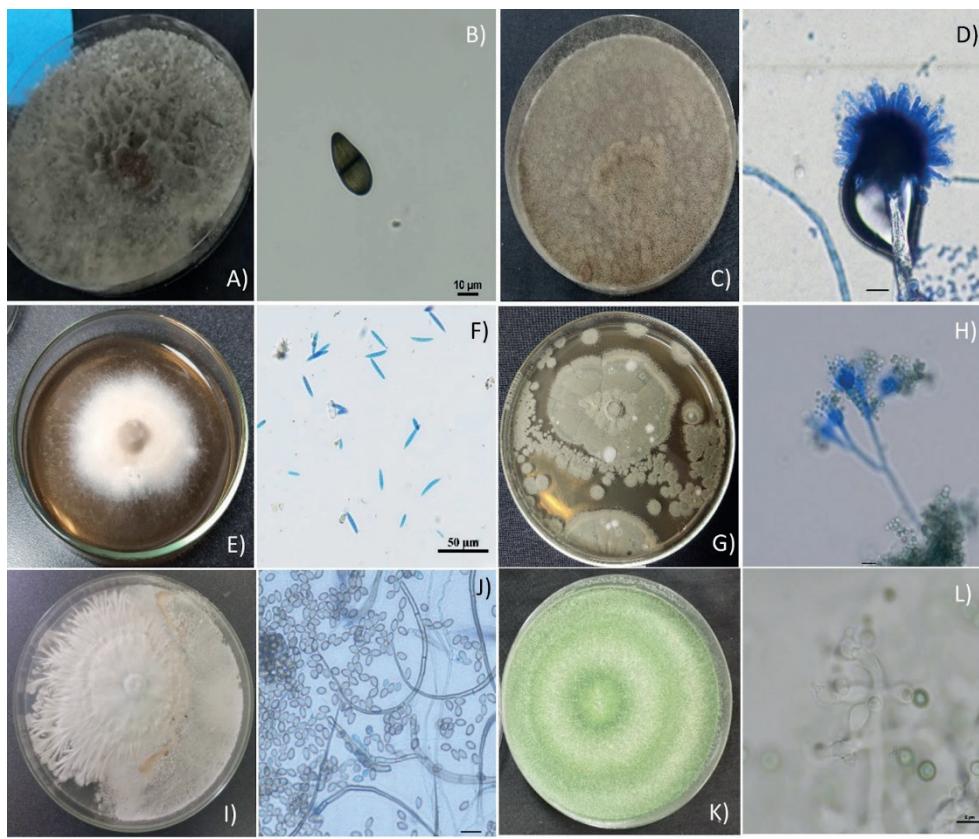


Figura 6. Fotografías de hongos aislados a partir de muestras de madera presentes en edificaciones con valor patrimonial. A-B) *Lasiodiplodia theobromae*. C-D) *Aspergillus niger*. E-F) *Fusarium solani*. G-H) *Penicillium citrinum*. I-J) *Coprinellus radians*. K-L) *Trichoderma* spp.

Conclusiones y recomendaciones

Los tres casos presentados evidencian estados de conservación disímiles, donde es posible detectar lesiones tanto de tipo físico, mecánico y químico; la condición de uso, los factores climáticos y las posibilidades de inversión en mantenimiento para cada edificio constituyen aspectos importantes que influyen en la situación que presenta cada inmueble. Esta aportación se centra en las lesiones de tipo químicas ligadas al biodeterioro, en especial en aquellas provocadas por hongos, para las cuales la microscopía óptica fue un recurso de gran utilidad.

El deterioro de la madera como material constructivo en ambientes tropicales está asociado con la presencia de microorganismos, entre ellos los hongos [22] [23] [24]. La identificación precisa de los agentes causantes del biodeterioro mediante técnicas avanzadas, como la microscopía óptica, permite identificar la especie de hongo involucrada, el tipo de daño que causa (superficial o estructural) y el grado de afectación a la estructura de la madera, además al identificar el agente de deterioro se obtiene información sobre las condiciones que favorecen su crecimiento y propagación.

Hongos como *Aspergillus niger*, *Penicillium citritum*, *Trichoderma* spp., y *Lasiodiplodia theobromae*, identificados en los tres inmuebles muestreados, son conocidos por causar diversos tipos de deterioro en la madera [25] [26] [27]. El hongo *L. theobromae* produce manchas y decoloración, sin embargo, [22] ha reportado que también afecta la resistencia mecánica de la madera. En el caso de *A. niger* y *P. citritum* son hongos que causan pudrición

blanda, donde su daño es superficial con manchas y decoloración, con capacidad de producir daño estructural, además, son hongos activos en condiciones de alta humedad relativa y son capaces de adaptarse a condiciones adversas [26] [28] [29].

Otros hongos identificados en este estudio como *Cladosporium*, *Sclerotinia* y *C. radians* provocan biodeterioro significativo ya que son capaces de degradar lignocelulosa afectando la integridad estructural de la madera [30] [31]. Todos los hongos identificados pueden colonizar diferentes tipos de maderas, particularmente aquellas más susceptibles, como las maderas blandas y menos densas como el pino, cedro, melina o pochote [32] [33] [34] [35] las cuales se utilizaron en ciertos cerramientos de los inmuebles estudiados. Por el contrario, maderas con densidades superiores a 600kg/m³ como el cocobolo, el almendro y el laurel, suelen ser más resistentes a la pudrición [32] [35] [36].

La colonización de estos hongos puede comenzar en condiciones de humedad sostenida o en exposición prolongada por encima del 20%, lo que crea un ambiente propicio para su crecimiento [23] [37]. Siendo evidente que los materiales utilizados en la construcción, como la madera, son susceptibles al ataque de hongos, particularmente en climas húmedos. El biodeterioro no solo afecta la estética, en algunos casos compromete la durabilidad estructural [23] [24] [28].

Gracias al uso de la microscopía se identificó un total de 42 especies de hongos presentes en los tres inmuebles estudiados, de estos fue posible identificar la recurrencia de cinco especies en las tres edificaciones y una especie presente en dos edificaciones. La mayoría de estas especies corresponden a ascomicetos, que son hongos que generan principalmente daños de carácter estético a la madera, sin embargo, algunos de ellos (*L. theobromae*, *C. radians*, *A. niger*) tienen la capacidad de degradar celulosa y lignina por lo que podría llegar a causar daños estructurales en la madera.

Se ha podido evidenciar que el uso de la microscopía facilita el proceso de identificación de especies de hongos en la madera, en el caso de edificaciones patrimoniales constituye una herramienta que permite diagnósticos más certeros sin generar afectaciones a los inmuebles. Sin embargo, es recomendable realizar un acompañamiento con análisis molecular para complementar la identificación o lograr identificar aquellos hongos que no esporulen e incluso los no se lograron aislar, pero están presentes en la madera.

Como se ha demostrado con esta aportación, el trabajo interdisciplinario, apoyado en el uso de técnicas no invasivas como la microscopía por el tamaño de muestra, permitió realizar estudios patológicos con respaldo científico y con una visión integral. Los resultados de este tipo de estudio ofrecen valiosos insumos para poder determinar los tratamientos más efectivos tanto para la restauración como para el mantenimiento de edificaciones; sin embargo, es un área en la que, al menos en el país, se requiere mayor profundización y nuevas investigaciones que incluyan este aspecto dentro de su alcance.

Agradecimientos

Las personas autoras de este artículo agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del TEC por el financiamiento de las investigaciones de las cuales se extraen los casos de estudio presentados. Asimismo, agradecen a los distintos investigadores y estudiantes asistentes que participaron como parte del equipo investigador de los proyectos “Conservación de la arquitectura caribeña costarricense a partir de la aplicación de técnicas de avanzada para el estudio de agentes causantes de lesiones en las edificaciones”,

"Aplicación de técnicas no invasivas para el estudio patológico en edificaciones patrimoniales" y "Caracterización de la arquitectura vernácula de madera de la ciudad de Puntarenas a partir de una perspectiva interdisciplinaria".

Referencias

- [1] C. Broto and A. Mostaedi, *Enciclopedia Broto de Patologías de la Construcción*. Barcelona, España: Links International, 2005, p. 1389.
- [2] D. Isola, H. Lee, Y. Chung, L. Zucconi, and C. Pelosi, "Once upon a time, there was a piece of wood: Present knowledge and future perspectives in fungal deterioration of wooden cultural heritage in terrestrial ecosystems and diagnostic tools," *Journal of Fungi*, vol. 10, 2024. doi: 10.3390/jof10050366.
- [3] A. Mohamed, W. Akram, and D. Murali, "A critical review on building pathology," *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2023. doi.org/10.29322/ijrsp.13.05.2023.p13725.
- [4] M. De Vita, G. Massari, P. De Berardinis, and L. M. Palmero Iglesias, "More comprehension, more protection: Non-destructive techniques in the survey of the former S. Salvatore hospital in L'Aquila, Italy," *SCIRES-IT*, vol. 9, no. 2, pp. 85-94, 2019.
- [5] B. Tejedor, E. Lucchi, D. Bienvenido-Huertas, D. and I. Nardi. "Non-Destructive Techniques (NDT) for the diagnosis of heritage buildings: traditional procedures and futures perspectives". *Energy and Buildings*, Vol. 263. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112029>.
- [6] P. Alfieri, D. Alves, and L. Traversa, "Non-destructive diagnosis of the biodeterioration of heritage assets through optical microscopy," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 43, pp. 249-254, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.11.013>.
- [7] F. Schwarze, "Wood decay under the microscope," *Fungal Biology Reviews*, vol. 21, pp. 133-170, 2007. <https://doi.org/10.1016/J.FBR.2007.09.001>.
- [8] A. Fernández, "El patrimonio histórico-arquitectónico en el panorama cultural de Costa Rica," *Rev. Herencia*, vol. 23, 2010. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/herencia/article/view/10337>
- [9] K. García-Baltodano, I. Hernández-Salazar, D. Porras-Alfaro, D. Méndez-Álvarez, D. Chang-Albizurez, E. Salazar-Ceciliano, and M. Guevara-Murillo, "Inventario de edificaciones de arquitectura caribeña costarricense en la ciudad de Limón," Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2021. <https://hdl.handle.net/2238/13405>.
- [10] K. García-Baltodano and D. Porras-Alfaro, "Vernacular wooden architecture in the city of Puntarenas: First steps towards its recognition," *Buildings*, vol. 15, no. 2, p. 182, 2025. <https://doi.org/10.3390/buildings15020182>.
- [11] K. García-Baltodano et al. "Conservación de la arquitectura caribeña costarricense a partir de la aplicación de técnicas de avanzada para el estudio de agentes causantes de lesiones en las edificaciones". RepositorioTEC. Accedido el 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/14556>.
- [12] D. Porras-Alfaro, K. García-Baltodano, D. Méndez-Álvarez. Estudio del conjunto edificatorio patrimonial del Museo Nacional de Costa Rica desde una perspectiva histórica, arquitectónica y patológica. Actas del 9th REHABEND Congress. Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management. September 13-16, 2022. Granada, España.
- [13] K. García-Baltodano, D. Méndez-Álvarez. "Investigación interdisciplinaria sobre la arquitectura vernácula de Puntarenas". InvestigaTEC, 17, p. 38-43. 2024. <https://doi.org/10.18845/itec.v17i50.7163>
- [14] Climate data, "Clima Limón, Costa Rica", 2025. [Online]. Disponible en: <https://es.climate-data.org/america-del-norte/costa-rica/limon/limon-19509/> [Fecha de acceso: Marzo, 2025].
- [15] Climate data, "Clima Puntarenas, Costa Rica", 2025. [Online]. Disponible en: <https://es.climate-data.org/america-del-norte/costa-rica/puntarenas-1002/> [Fecha de acceso: Marzo, 2025].
- [16] Climate data, "Clima San José, Costa Rica", 2025. [Online]. Disponible en: <https://es.climate-data.org/america-del-norte/costa-rica/alajuela/san-jose-1888/> [Fecha de acceso: Marzo, 2025].
- [17] L. Hilje Quirós, "Un museo nacional para Costa Rica, a mediados del siglo XIX," *Revista Comunicación*, vol. 35, no. 2, pp. 1-16, Jul.-Dec. 2014. https://www.researchgate.net/publication/316448651_Un_Museo_Nacional_para_Costa_Rica_a_mediados_del_siglo_XIX.
- [18] D. Porras-Alfaro, D. Méndez-Álvarez, and K. García-Baltodano, "Procesos de intervención y estado de conservación del conjunto edificatorio del Museo Nacional de Costa Rica," *Tecnología en Marcha*, vol. 36, no. 9, pp. 20-33, 2023. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i9.6955>.

- [19] I. Hernández-Salazar, D. Méndez-Álvarez, and K. García-Baltodano, "Estudio de lesiones recurrentes en edificaciones de arquitectura caribeña costarricense y su relación con hongos de pudrición," en *Proceedings of Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management*, mayo, 2024, España.
- [20] R. Moya-Roque and C. Tenorio-Monge, "Informe técnico: Identificación de especies maderables que componen la Casa Misionera Bautista, provincia de Limón, Costa Rica," CIF, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2020, pp. 6.
- [21] R. Moya-Roque, "Informe técnico: Identificación de especies maderables que componen la Escuela El Carmen, provincia de Puntarenas, Costa Rica," CIF, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2023, pp. 3.
- [22] O. Encinas, B. Henningsson, and G. Daniel, "Changes in toughness and fracture characteristics of wood attacked by the blue stain fungus *Lasiodiplodia theobromae*," *Holzforschung*, vol. 52, no. 1, pp. 82–88, 1998. doi:10.1515/hfsg.1998.52.1.82.
- [23] G. Lim, T. K. Tan, and A. Toh, "The fungal problem in buildings in the humid tropics," *International Biodeterioration*, vol. 25, no. 1-3, pp. 27–37, 1989. doi:10.1016/0265-3036(89)90026-2.
- [24] M. J. Kim, Y. S. Choi, J. J. Oh, and G. H. Kim, "Experimental investigation of the humidity effect on wood discoloration by selected mold and stain fungi for a proper conservation of wooden cultural heritages," *Journal of Wood Science*, vol. 66, no. 1, pp. 1-5, 2020.
- [25] J. Douglas and J. Singh, "Investigating dry rot in buildings: The paper indicates a systematic method for surveying buildings for dry rot," *Building Research and Information*, vol. 23, no. 6, pp. 345-352, 1995. doi:10.1080/09613219508727487.
- [26] A.P. Singh, "A review of microbial decay types found in wooden objects of cultural heritage recovered from buried and waterlogged environments," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 13, no. 3, pp. S16-S20, 2012.
- [27] Y. S. Lee, "Observation of soft-rot wood degradation caused by higher Ascomyceteous fungi," *Mycobiology*, vol. 28, no. 1, pp. 47-50, 2000. doi: 10.1080/12298093.2000.12015721.
- [28] M. Subramaniam, N. M. Sunar, A. Latif, U. K. Parjo, C. M. Er, and A. R. Ab Razak, "The growth of *Aspergillus niger* on a wood-based material with 4 types of wall finishing," en *MATEC Web of Conferences*, vol. 47, p. 05007, 2016. EDP Sciences.
- [29] G. B. Goffredo, B. Citterio, F. Biavasco, F. Stazi, S. Barcelli, and P. Munafò, "Nanotechnology on wood: The effect of photocatalytic nanocoatings against *Aspergillus niger*," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 27, pp. 125-136, 2017. doi.org/10.1016/j.culher.2017.04.006.
- [30] V. Polizzi, A. Adams, A. M. Picco, E. Adriaens, J. Lenoir, C. Van Peteghem, and N. De Kimpe, "Influence of environmental conditions on production of volatiles by *Trichoderma atroviride* in relation with the sick building syndrome," *Building and Environment*, vol. 46, no. 4, pp. 945-954, 2011. doi: 10.1016/j.buildenv.2010.10.024.
- [31] J. Gabriel and K. Švec, "Occurrence of indoor wood decay basidiomycetes in Europe," *Fungal Biology Reviews*, vol. 31, no. 4, pp. 212-217, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2017.05.002>.
- [32] J. Chave, H. C. Muller-Landau, T. R. Baker, T. A. Easdale, H. T. Steege, and C. O. Webb, "Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species," *Ecological Applications*, vol. 16, no. 6, pp. 2356-2367, 2006.
- [33] C. Tenorio and R. Moya, "Evaluation of wood properties of four ages of *Cedrela odorata* trees growing in agroforestry systems with *Theobroma cacao* in Costa Rica," *Agroforestry Systems*, vol. 93, no. 3, pp. 973-988, 2019.
- [34] L. D. Pérez Cordero and M. Kanninen, "Intensive management of pochote (*Bombacopsis quinata*) in Costa Rica," en *Memoria del taller-seminario: especies forestales nativas*, Heredia, Costa Rica, 4-5 abril 2002, pp. 80-83.
- [35] G. Reyes, *Wood densities of tropical tree species*, vol. 88, US Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 1992.
- [36] D. Rodríguez-Pérez, R. Moya, O. Murillo, J. Gaitán-Álvarez, and Y. Badilla-Valverde, "Variation and genetic control of the heartwood, sapwood, bark, wood color parameter, and physical and mechanical properties of *Dipteryx panamensis* in Costa Rica," *Forests*, vol. 13, no. 1, p. 106, 2022.
- [37] A. M. Eligon, A. Achong, and R. Saunders, "Moisture adsorption and desorption properties of some tropical woods," *Journal of Materials Science*, vol. 27, pp. 3442–3456, 1992.
- [38] H. Viitanen, "Factors affecting the development of biodeterioration in wooden constructions," *Materials and Structures*, vol. 27, no. 8, pp. 483–493, 1994. doi:10.1007/bf02473453.

- [39] A. Segura, "Plan de acción para aumentar el uso de madera nacional en la industria de la construcción y de esta forma contribuir a la gestión sostenible de los bosques y el aumento de reservas de carbono forestal", [en línea], disponible en: <https://reddcostarica.net/publicacion/plan-de-accion-para-aumentar-el-uso-de-madera-nacional-en-la-industria-de-la-construcion/> [Fecha de acceso: 29/04/2025]

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Utilizamos la herramienta de inteligencia artificial *Deep*/ para traducir partes de este artículo del inglés al español. La herramienta nos ayudó a agilizar el proceso de traducción, pero realizamos una revisión exhaustiva para asegurar la calidad y precisión de las traducciones.