

**Análisis descriptivo del comportamiento de la madera para resistir al fuego y los
procedimientos conexos para su protección eficiente ante la flamabilidad**

Andrés Leonardo Vargas Arévalo

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ciencia y Tecnología

Especialización en Patología de la Construcción

Bogotá, D.C.

2020

**Análisis descriptivo del comportamiento de la madera para resistir al fuego y los
procedimientos conexos para su protección eficiente ante la flamabilidad**

Andrés Leonardo Vargas Arévalo

Magíster. Walter Mauricio Barreto Castillo

Director del proyecto

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ciencia y Tecnología

Especialización en Patología de la Construcción

Bogotá, D.C.

2020

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá, Marzo de 2020.

Agradecimientos

El autor expresa su agradecimiento a:

A la memoria de mi madre Elvira Arévalo Miranda por darme el espíritu estudiantil.

A mi padre Víctor Hugo Vargas Silva, hermano Ricardo Vargas Arévalo y tía Patricia Vargas Silva por el ánimo que inyectaron cada día para conseguir mis metas.

A Fernando Casadiego y Rafael Padilla por colocar su granito de arena en este proceso.

A mi compañero de estudio Mario Monsalve, por la perseverancia que puso en mí.

A mis compañeros de trabajo, que sin saberlo pusieron alegría en el día a día, Leonardo Basto, Emelson Orozco, Andrés Martínez, Dubán Jiménez, Carlos Ordoñez, Ronald Rojas, Hugo Furnieles, Edinson Pardo, Diego Díaz, Eduar Pérez.

A mi querida novia, Marianina Barone Fernández que con su entendimiento y comprensión vivió todo el proceso de estudio y de sacrificio que conllevo la especialización.

A la Universidad Santo Tomás por la oportunidad ofrecida a través de este proceso académico.

Esta tesis de grado es el fruto de la constancia como estudiante de un proceso de enseñanza y aprendizaje, orientada por el Mg. Walter Mauricio Barreto Castillo, quien, con su amplio conocimiento, fue la guía en este complejo proceso, quien con su ayuda y paciencia se pudo realizar de una manera grata y satisfactoria.

Contenido

	Pág.
Glosario.....	10
Resumen.....	11
Abstract.....	12
Resumo.....	13
1. Descripción del problema	14
1.1 Planteamiento del problema.....	15
1.2 Justificación	16
1.3 Objetivos	17
<i>1.3.1 Objetivo general.....</i>	<i>17</i>
<i>1.3.2 Objetivos específicos</i>	<i>17</i>
2. Marco teórico	18
2.1 Antecedentes investigativos	18
<i>2.1.1 Antecedentes internacionales.....</i>	<i>18</i>
<i>2.1.1 Antecedentes nacionales.....</i>	<i>21</i>
2.2 Marco conceptual	23
<i>2.2.1 Patología de la madera</i>	<i>23</i>
<i>2.2.2 Incendio, reacción y resistencia al fuego.....</i>	<i>24</i>
<i>2.2.3 Comportamiento de la madera al fuego.....</i>	<i>25</i>
<i>2.2.4 Protección de la madera</i>	<i>27</i>
<i>2.2.5 Estrategias de prevención, detección y extinción</i>	<i>29</i>

2.2.6 <i>Relación resistencia-temperatura</i>	31
2.3 Marco legal.....	32
3. Metodología.....	35
3.1 Tipo de estudio.....	35
3.2 Diseño de la investigación.....	35
3.3 Fuentes de información.....	37
3.4 Población y muestra	37
3.4.1 <i>Criterios de inclusión</i>	38
3.4.2 <i>Criterios de exclusión</i>	38
3.5 Análisis y recolección de la información	38
4. Resultados.....	40
4.1 Publicaciones por categorías	40
4.2 Comportamiento de la madera al fuego.....	42
4.3 Resistencia de la madera al fuego	50
4.4 Comportamiento de maderas desarrolladas para resistir el fuego.....	53
4.5 Procedimientos preventivos y correctivos para la protección eficiente ante la flamabilidad	57
Discusión	64
Conclusiones	67
Recomendaciones	70
Referencias.....	71
Apéndice.....	74

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Cumplimiento de objetivos</i>	176
Tabla 2. <i>Distribución de publicaciones por categoría</i>	4140
Tabla 3. <i>Eficiencia energética del bambú</i>	498
Tabla 4. <i>Carga de fuego calculada para techo de madera</i>	510
Tabla 5. <i>Tratamientos evaluados Vs composición de material utilizado</i>	543
Tabla 6. <i>Algunos preservantes para la protección de la madera.</i>	610

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Distribución porcentual de artículos por categorías	421
<i>Figura 2.</i> Efectos de la descomposición térmica de la madera y sus componentes	432
<i>Figura 3.</i> Temperatura de ignición con y sin llama directa	443
<i>Figura 4.</i> Temperaturas registradas por termopares.....	465
<i>Figura 5.</i> Flujo del proceso de tableros de madera plástica con propiedades ignífugas	554
<i>Figura 6.</i> Comparación de índices de carbonización	587

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Relación de artículos seleccionados	744

Glosario

Flamabilidad: Porcentaje que se le asigna a un material, respecto a la característica que tiene de quemarse o prenderse mientras está expuesto a llamas.

Ignífugos: Sustancia utilizada para hacer ininflamables las sustancias combustibles.

Pirolisis: Es la descomposición química de materia orgánica y todo tipo de materiales, excepto metales y vidrios, causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. Involucra cambios simultáneos de composición química y estado físico, los cuales son irreversibles.

Retardantes de fuego: Los retardantes de llama hacen referencia a una variedad de sustancias que se añaden a los materiales combustibles para evitar incendios o disminuir la propagación del fuego y proporcionar un tiempo de escape adicional.

Descomposición térmica: La termólisis es la reacción en la que un compuesto se separa en al menos otros dos cuando se somete a un aumento de temperatura.

Madera: Sustancia dura y fibrosa que forma el tronco y las ramas de los árboles.

Maderas desarrolladas: Es un material fabricado a partir de residuos de madera y plásticos reciclados seleccionados, resultando en un material de mayor durabilidad y menor mantenimiento.

Resistencia al fuego: La resistencia al fuego es el grupo de técnicas que nos permite examinar y clasificar a un conjunto de materiales, formando un elemento constructivo completo, en cuanto al cumplimiento de un cierto nivel de funciones estructurales y/o compartimentales dentro del edificio en caso de incendio.

Resumen

ANÁLISIS DESCRIPTIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LA MADERA PARA RESISTIR AL FUEGO Y LOS PROCEDIMIENTOS CONEXOS PARA SU PROTECCIÓN EFICIENTE ANTE LA FLAMABILIDAD

La presente investigación tuvo como objeto central describir el comportamiento de la madera para resistir al fuego y los procedimientos conexos para su protección eficiente ante la flamabilidad, a partir de la elaboración de un estado del arte sobre las principales tendencias en el tema a nivel mundial. La metodología de enfoque cualitativo, de tipo descriptivo y corte transversal, permitió la recolección de diferentes publicaciones disponibles en libros base de datos y revistas especializadas publicadas desde el año 2010 al 2019. Para la obtención de la información se estableció una serie de tres categorías relacionadas con el comportamiento y resistencia de la madera al fuego, y los procedimientos para la protección eficiente ante la flamabilidad. Se seleccionaron 55 artículos de los cuales el 34,55% corresponden a fuentes asociadas al comportamiento de la madera al fuego, el 18,18% versan sobre la resistencia de la madera al fuego, el 38,18% están vinculados a los procedimientos de protección efectiva de la madera contra el fuego, y por último, el 9,09% de los documentos tienen que ver con el comportamiento de maderas desarrolladas para resistir el fuego. Los resultados señalan que existe una limitada producción investigativa actual sobre el tema a nivel latinoamericano, pues los referentes provienen de estudios en Europa y estados Unidos principalmente. Se pudo determinar que existen tendencias destacadas en relación a la resistencia de la madera al fuego, así como avances importantes en la comprensión del comportamiento de la madera ante la flamabilidad. Se concluye que los avances en nanotecnología ofrecen la mejora alternativa futura para crear maderas resistentes al fuego, y se dilucida un panorama de maderas modificadas para su uso estructural más eficiente ante el fuego.

Palabras clave: Madera, Tecnología, Flamabilidad, Investigación.

Abstract

DESCRIPTIVE ANALYSIS OF BEHAVIOR OF WOODS TO RESIST FIRE AND RELATED PROCEDURES FOR EFFECTIVE PROTECTION BEFORE FLAMABILITY

The purpose of this research was to describe the behavior of wood to resist fire and related procedures for its efficient protection against flammability, based on the elaboration of a state of the art on the main trends in the subject worldwide. The qualitative approach methodology, descriptive and cross-sectional, allowed the collection of different publications available in database books and specialized journals published from 2010 to 2019. To obtain the information, a series of three related categories was established. with the behavior and resistance of wood to fire, and procedures for efficient protection against flammability. 55 articles were selected, of which 34.55% correspond to sources associated with the behavior of wood to fire, 18.18% deal with the resistance of wood to fire, 38.18% are linked to the procedures of effective protection of wood against fire, and finally, 9.09% of the documents have to do with the behavior of woods developed to resist fire. The results indicate that there is a limited current research production on the subject at the Latin American level, as the references come mainly from studies in Europe and the United States. It was possible to determine that there are outstanding trends in relation to the resistance of wood to fire, as well as important advances in the understanding of the behavior of wood before flammability. It is concluded that the advances in nanotechnology offer the future alternative improvement to create fire-resistant wood, and a panorama of modified wood for its more efficient structural fire use is elucidated.

Keywords: Wood, Technology, Flammability, Research.

Resumo

ANÁLISE DESCRITIVA DO COMPORTAMENTO DE MADEIRA PARA RESISTIR AO FOGO E PROCEDIMENTOS RELACIONADOS PARA PROTEÇÃO EFICAZ ANTES DA INFLAMABILIDADE

O objetivo desta pesquisa foi descrever o comportamento da madeira para resistir ao fogo e procedimentos relacionados para sua proteção eficiente contra a inflamabilidade, com base na elaboração de um estado da arte sobre as principais tendências do assunto em todo o mundo. A metodologia da abordagem qualitativa, descritiva e transversal, permitiu a coleta de diferentes publicações disponíveis em livros de banco de dados e periódicos especializados publicados de 2010 a 2019. Para obter as informações, foi estabelecida uma série de três categorias relacionadas com o comportamento e a resistência da madeira ao fogo e procedimentos para proteção eficiente contra a inflamabilidade. Foram selecionados 55 artigos, dos quais 34,55% correspondem a fontes associadas ao comportamento da madeira ao fogo, 18,18% lidam com a resistência da madeira ao fogo, 38,18% estão vinculados aos procedimentos de proteção eficaz da madeira contra o fogo e, finalmente, 9,09% dos documentos têm a ver com o comportamento das madeiras desenvolvidas para resistir ao fogo. Os resultados indicam que há uma produção atual limitada de pesquisas sobre o assunto no nível latino-americano, pois as referências vêm principalmente de estudos na Europa e nos Estados Unidos. Foi possível determinar que existem tendências destacadas em relação à resistência da madeira ao fogo, além de importantes avanços no entendimento do comportamento da madeira antes da inflamabilidade. Conclui-se que os avanços da nanotecnologia oferecem a futura melhoria alternativa para criar madeira resistente ao fogo, e é elucidado um panorama da madeira modificada para seu uso estrutural mais eficiente do fogo.

Palavras-chave: Madeira, Tecnologia, Inflamabilidade, Pesquisa.

1. Descripción del problema

La madera como elemento estructural es un material de gran importancia para la ingeniería y la construcción, por su gran versatilidad, manejabilidad y fácil puesta en obra. Prueba de ello son las estructuras de maderas y casas antiguas que todavía siguen en pie reflejando su valor histórico o monumental que son considerados como patrimonio arquitectónico y/o cultural (Bustos-Molina, Bonfante-Polo, & Rivera-Martínez, 2014).

Las investigaciones y datos acerca de las propiedades físicas y mecánicas de la madera son poco tenidas en cuenta por parte de los constructores, esto se debe a que los conocimientos de las técnicas empleadas al trabajar con éste material, los adquieren empíricamente (Keenan & Tejada, 1987). Una de las mayores dificultades de la conservación de las construcciones de maderas es poder diagnosticar las causas del deterioro de la edificación y a su vez plantear posibles soluciones ante estos problemas de una determinada madera, para esto se necesita conocer un patrón que indique si dicha estructura en estudio se encuentra en un estado idóneo o no. Dicho patrón, debe derivarse de estudios profundos, en los que se tenga en cuenta un aspecto clave que permita identificar fácilmente, la presencia de una anomalía de los elementos estructurales, lo cual se convierten en un componente fundamental para cualquier programa de conservación (Arriaga, 2002).

En Colombia, el uso de la madera en el sector de la construcción actualmente se ve restringido por la insuficiencia de conocimientos técnicos en infraestructura de producción adecuada, de leyes, normas y además, debido a prejuicios derivados del desconocimiento del material por parte de los usuarios (Bustos-Molina, Bonfante-Polo, & Rivera-Martínez, 2014).

Adicionalmente, en la literatura se han reportado una serie de causas bióticas (bacterias, hongos, insectos, etc.) y abióticas (sol, lluvia, fuego, cenizas, granizo, inundaciones, nevadas, radiación, viento, oxígeno, temperatura, calor, etc.) que causan deterioro de los componentes propios de la madera, de aquellos vinculados a la estructura en diversos tipos de edificaciones, donde la madera no escapa ante dichos factores, con especial atención de aquellos de tipo abiótico.

Aunque el deterioro de la madera se ve tradicionalmente como proceso biológico, puede también degradarse por los agentes físicos y químicos o llamados también abióticos, los cuales en la mayoría de los casos son de actuar lento, pero pueden llegar a ser absolutamente serios en localizaciones específicas, y de reacción muy rápida como el fuego. Los agentes físicos y químicos incluyen abrasión mecánica o impacto, luz ultravioleta, subproductos de corrosión del metal, y ácidos o bases fuertes.

El daño por los agentes físicos se puede confundir por ataque biótico en el aspecto general de la madera, lo que puede advertirse por la naturaleza del daño. Es por eso, que resulta de interés establecer cuáles son los procedimientos de protección de la madera ante patologías causadas por agentes abióticos como las ocasionadas por fuego, en el fin de proporcionar información válida y actualizada sobre las principales tendencias para su salvaguarda eficiente.

1.1 Planteamiento del problema

Sobre la base de la descripción del problema se plantea la siguiente pregunta de investigación: **¿Cuáles son de los procedimientos de mayor eficiencia para la protección de la madera ante el fuego?**

1.2 Justificación

Para prolongar la vida útil de las estructuras en madera, resulta de mucha utilidad recurrir a lo expuesto en la Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR-10), en el título correspondiente a estructuras en madera (Título G), donde se brindan recomendaciones para el cuidado y el mantenimiento a las obras realizadas con éste material. También se hace necesario estudiar la patología, características físicas y mecánicas de las especies de madera que habitualmente se utilizan como elementos permanentes en las obras, mediante inspecciones visuales, recopilación bibliográfica y ensayos para ofrecer una herramienta confiable, que permita tomar decisiones para la selección de una determinada especie, dependiendo de las exigencias de la obra y las condiciones ambientales.

Dentro de las patologías de la madera, se pueden incluir daños causados por la propia configuración y distribución de la fibra de la madera, como es el caso de los nudos y hendiduras naturales de cualquier espécimen, los cuales son un problema que en un determinado momento, pueden conllevar a la exclusión de una pieza de madera en una obra, según el criterio del constructor o restaurador, por lo que resulta de importancia su estudio y caracterización.

No obstante, la madera puede sufrir lesiones a partir de agentes abióticos como el fuego que puede presentarse de forma sistemática o aparecer de forma inusual o repentina, por lo que caracterizar los procedimientos de mayor eficiencia que se usan a nivel mundial para la protección de la madera ante el fuego resulta imperativo ante la cantidad de edificaciones que utilizan la madera como parte de la estructura o como elemento que embellece interna y externamente algunos espacios arquitectónicos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Describir el comportamiento de la madera para resistir al fuego y los procedimientos conexos para su protección eficiente ante la flamabilidad, a partir de la elaboración de un estado del arte sobre las principales tendencias en el tema a nivel mundial.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Realizar una búsqueda de literatura científica disponible en bases de datos sobre el comportamiento de la madera usada en edificaciones para resistir al fuego.
2. Determinar los procedimientos de mayor eficiencia para la protección de la madera ante el fuego.
3. Describir los manejos preventivos y correctivos del deterioro de la madera derivado de agentes abióticos como el fuego.

Tabla 1. *Cumplimiento de objetivos*

No	Objetivo	Ítem
1	Realizar una búsqueda de literatura científica disponible en bases de datos sobre el comportamiento de la madera usada en edificaciones para resistir al fuego.	4.1
2	Determinar los procedimientos de mayor eficiencia para la protección de la madera ante el fuego.	4.2; 4.3 y 4.4
3	Describir los manejos preventivos y correctivos del deterioro de la madera derivado de agentes abióticos como el fuego.	4.5

Fuente: Autor.

2. Marco teórico

En esta sección se presentan los antecedentes investigativos de mayor relevancia con el objeto de estudio de la presente investigación, a fin de establecer un marco de conexión informativa que permita trazar una ruta de indagación concreta, acorde con los objetivos propuestos.

2.1 Antecedentes investigativos

2.1.1 Antecedentes internacionales

Mozo (2018) en su investigación: “**Madera y fuego**”, de la cual se deriva un manual que lleva el mismo nombre, tuvo como objetivo analizar el comportamiento de la madera frente al fuego, partiendo de considerar su tratamiento previo y posteriores ensayos y certificación de procedimientos. Para productos de la construcción y elementos constructivos de la madera el material se clasifica mediante la asignación de una de las siguientes clases, también denominadas Euroclases, según su reacción al fuego: A1, A2, B, C, D, E y F.

Dicha clasificación fue orientativa para evaluar la capacidad de la madera como material para favorecer o retardar el desarrollo del incendio e indicar si es combustible o incombustible, mediante la aplicación de elementos preventivos. El autor concluye que la resistencia al fuego de los elementos constructivos se basa en la evaluación del tiempo durante el cual el elemento es

capaz de cumplir la función para la cual ha sido instalado, analizando la capacidad portante, integridad y aislamiento.

Por su parte Garay & Henriquez (2010) en su artículo: **“Comportamiento frente al fuego de tableros y madera de pino radiata con y sin pintura retardante de llama”**, mencionan que en aplicaciones para la construcción se requiere aportar al conocimiento del comportamiento de la madera y tableros a base de madera frente a la acción del fuego para mejorar condiciones de uso en servicio. El estudio realizado por los autores tuvo como propósito comparar en tableros a base de madera y en madera sólida de pino radiata el efecto de una pintura retardante de fuego y testigos sin pintar, con el fin de discriminar entre tipos de tableros y comparar con respecto a la madera sólida.

Los tableros ensayados fueron: Contrachapado estructurales de Pino radiata D. Don, Oriented Strand Board (OSB), Medium Density Fiberboard (MDF), Hard Board (HB) y tableros de partículas, los que fueron pintados superficialmente con pintura retardante de llama y comparados con tableros sin protección. Se incluyó en el estudio, madera de pino radiata con y sin retardante de llama.

El análisis estadístico indicó diferencias significativas en pérdida de peso e índice de carbonización para todos los tableros con retardante de llama al compararlos con los tableros sin protección. Entre tableros estructurales: contrachapados y OSB, el contrachapado con retardante de llama fue el que presentó un mejor comportamiento frente al fuego y, HB presentó el comportamiento más deficiente.

Los autores concluyeron que una pintura retardante de llama resulta efectiva en la protección de los tableros estudiados al comparar con tableros sin protección. La aplicación de esta norma de ensayo fue un buen indicador del comportamiento al fuego y aportó información

significativa de los tableros, aconsejándose su empleo como un complemento de los ensayos de resistencia al fuego que se realizan a escala real.

En una revisión de la literatura de Herrero, Álvarez, Martitegui, González, & Maldonado (2007) titulada: “**Estado actual de la investigación sobre madera estructural en España**”, dibujan un panorama sobre el estado actual de la investigación en torno a la madera estructural desarrollada en España, a partir de una amplia recopilación de información entre personas e instituciones.

En poco tiempo ha sido implantado en España un nuevo marco legislativo y normativo definido por la Ley de Ordenación de la Edificación, el Código Técnico de la Edificación y la Directiva Europea de Productos de la Construcción. En este marco surgen algunos retos para el sector de la construcción a los que la madera no resulta ajena. La madera estructural se enmarca por primera vez en una normativa de obligado cumplimiento, lo que supone no sólo un reto sino la puesta en valor de todo su potencial como material estructural.

En este marco se han disparado las necesidades de investigación, desarrollo e innovación, y así lo demuestran las muchas líneas de investigación abiertas en España, con una clara vocación de responder a las necesidades surgidas en el sector y de satisfacer los requisitos de seguridad planteados en la normativa. En este artículo, la información recopilada se resumen las líneas de investigación sobre madera estructural que se están desarrollando en España, así como su presencia en medios de difusión nacional o internacional o sus aplicaciones directas en la industria.

Por su parte Ayúcar, Muro, Bollar & Fouz (2014) en su investigación: “**Rehabilitación de la estructura de madera del ayuntamiento de Berastegi (Gipuzkoa) mediante forjados colaborantes madera-hormigón**”, tuvo como objetivo principal la caracterización y realización

de cálculos estructurales para la rehabilitación de una estructura de madera en roble en el ayuntamiento de Berastegi en Gipuzkoa (2.500 m²) en el gobierno Vasco, la cual tiene mas de 300 años de haberse edificado.

La metodología empleada por los autores fue la determinar cuáles eran los procedimientos que debían llevarse a cabo para subsanar el tema de cargas de uso y resistencia al fuego de la estructura, de manera tal que superarán a los resultados del diagnóstico, y con lo cual se pudiera generar un refuerzo de la estructura. En este sentido, se aplicaron forjados de madera y hormigón que permitieron mantener la estructura en relación a su capacidad de carga y adicionalmente se hicieron unas pruebas de duración de resistencia al fuego.

Como consecuencia de las uniones Viga-Pilar que se colocaron ocultos en la propia estructura de la madera para protegerlos contra el fuego, varias resisto grafías y análisis de flamabilidad permitieron el refuerzo a la estructura y disminución de la acción del fuego sobre la misma. Los autores concluyen que a través de refuerzos estructurales se puede lograr una mejor carga de uso hasta de 500 kg/m² y una resistencia al fuego de la estructura R90 (90 minutos).

2.1.1 Antecedentes nacionales

En un estudio de Bonfante & Bustos (2014) titulado: “**Caracterización, clasificación y patología de las especies de maderas más usadas en la construcción como elementos estructurales permanentes en la ciudad de Cartagena**”, tuvo por objetivo la caracterización, clasificación y patología de las especies de madera más utilizadas en la ciudad de Cartagena como elementos estructurales permanentes. Para conocer cada una de las características de las

especies de madera estudiadas y su patología se procedió a realizar una investigación de tipo mixta, es decir, una investigación bibliográfica y una experimental.

La importancia del estudio residio en desarrollar una xiloteca, y una guía técnica ya que a través de estos productos se identifican y caracterizan las patologías y propiedades físicas y mecánicas de las especies de madera más utilizadas en la ciudad de Cartagena, entre las cuales se hallan el Guayacán Polvillo, Nazareno, Puy, Guayacán Trébol, Carreto y Abarco. A partir de los resultados de este estudio se brindó una base sólida de información e implementar un nuevo método semidestructivo, (Extracción de testigo con broca Sierra) para analizar el estado de las maderas in situ, un método no destructivo con el esclerómetro para estimar su resistencia a la compresión y además caracterizar las propiedades físicas y mecánicas para el uso adecuado de las maderas.

A partir de muestras de madera en buen estado y en deterioro evidente, se realizaron los ensayos mencionados. Los resultados que se lograron en el ensayo no destructivo, fueron relativamente buenos en las muestras sanas, porque graficando los valores de lectura contra la densidad, se observó que son directamente proporcionales, mientras que con las maderas en estado de deterioro, no se llegó al valor mínimo de la lectura del esclerómetro.

Para el ensayo semidestructivo en especímenes en ambos estados, se realizaron las respectivas perforaciones, obteniéndose para los sanos, testigos completos en algunos casos, y otros que en el proceso de la extracción se rompieron, pudiendo ser porque la madera es anisotrópica, porque presenta fractura propia, o simplemente por el corte que le concibieron inicialmente, entre otras. Al tacto se pudo determinar un estado sano y una buena apariencia de la viruta de la madera. En cuanto a los especímenes deteriorados, el producto de la extracción

consistió en unos testigos mayormente destrozados, muy porosos, bofos y con apariencia de corcho, acompañados de una viruta que denotaba un mal estado de la madera visualmente.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Patología de la madera

La patología hace referencia a las enfermedades que puede sufrir una estructura, en éste caso de madera, la cual puede ser causada por diferentes agentes, tanto bióticos, como abióticos, e influyen directamente en las propiedades físicas y mecánicas de los elementos afectados. Para prevenir los ataques de los agentes patógenos a las estructuras es necesario seguir ciertas recomendaciones de protección (Mendoza, 2016).

Resulta importante diferenciar entre lo que es una patología y lo que es una lesión, y la causa que lo produzca. Dado que de hecho, un proceso patológico no queda resuelto o anulado hasta que no se ha interrumpido su origen. Esto es uno de los puntos claves de toda reparación: no se trata de resolver un síntoma (lesión) sino de atacar la causa (el origen), puesto que si no es así, las lesiones volverán a aparecer de nuevo (Domenech, Baño, Cetrangolo, & Morquio, 2016).

Así pues, la causa es el agente, activo o pasivo, que actúa como origen del proceso patológico, y que desemboca en una o varias lesiones. En ocasiones, también puede ocurrir que varias causas actúen conjuntamente para producir una misma lesión. Con el diagnóstico, se pretende conocer la causa o causas de la enfermedad, su origen.

Para el caso de los agentes biológicos, para que éstos se desarrollen y subsistan se requiere que existan ciertas condiciones como son: fuente de material alimenticio para su

nutrición y temperatura para su desarrollo, el intervalo de temperatura es de 3° a 50°, siendo el óptimo alrededor de los 37 °C, la humedad debe estar entre el 20 % y el 140 %¹, para que la madera pueda ser susceptible de ataques de hongos. Por debajo del 20 %, el hongo no puede desarrollarse y sobre 140 % de humedad, no hay suficiente oxígeno para que pueda vivir (Herrera-Cardenete, Martínez-Ramos, & Iruela, 2016).

2.2.2 Incendio, reacción y resistencia al fuego

De acuerdo con la teoría del fuego se entiende que su origen está dado a partir de una reacción química entre un elemento combustible y otro denominado carburante catalizado por el oxígeno del cual se produce un desprendimiento de energía en forma de luz, calor o ambas, que esencialmente puede estar acompañado de una reacción in situ o de una reacción en cadena que genera la propagación del fuego. Valdes, Martínez, Bonilla, & Castillo (2016) mencionan en relación a los incendios provocados por el fuego que:

Un incendio es un fuego incontrolado cuya magnitud es consecuencia de los materiales que se encuentran en el edificio y cuya duración es función de los elementos estructurales con que dicho edificio esté construido. De ello se deduce que está condicionado a la calidad frente al fuego de todos los productos y estructuras que lo forman, considerados en conjunto. La reacción al fuego de cada material es el alimento que puede aportar al fuego y a su desarrollo (p.61).

¹ Tanto Herrera, Martínez & Iruela (2016) como Reinprecht, L. (2016) mencionan que en condiciones ambientales extremas la humedad puede superar el umbral del 100%, ya que si el contenido de humedad (de vapor de agua) en el aire permanece constante y su temperatura desciende, la humedad relativa aumenta, por consiguiente al disminuir la temperatura del aire, disminuye su capacidad para contener vapor de agua, y la humedad puede volverse un elemento inestable ambientalmente hablando, densificando el aire húmedo y desplazando la capa de aires seco sobre ella.

Es preciso mencionar que de la magnitud del fuego depende proporcionalmente la propagación del incendio y su evolución estará influenciada por elementos del medio que puedan ser combustionados. Es así, que determinados materiales del entorno pueden tener la capacidad de rechazar en cierta medida la combustión, es a lo que se denomina la resistencia al fuego de una estructura, calculada como el tiempo que ésta se mantiene cumpliendo su función al ser atacada por el fuego (Gracia, 2018).

De igual forma, la resistencia al fuego está acompañada del grado de reacción de un material o estructura a la flamabilidad, lo cual determina su comportamiento real al fuego, siendo determinante las características del conjunto de materiales que componen una edificación para dar paso a la afectación por fuego, en especial, esta situación cobra vigencia en la propagación de la llama a través de una estructura, pues en especial para el caso de la madera, se hace factible el desarrollo de la reacción en cadena. Canosa, Maly, Keil, Tonello, & Giúdice (2017) sobre el particular mencionan:

La reacción al fuego es importante al principio del incendio. Si es alta éste se iniciará fácilmente y se desarrollará de forma rápida. Habrá que reducirla en este caso mediante ignífugantes o evitando la colocación de materiales tan reactivos. En la fase de desarrollo del incendio influyen tanto la reacción como la resistencia, pues aquella violencia puede ser frenada por la existencia de comportamientos estancos al fuego contruidos con estructuras de alta resistencia al mismo, puertas y tabiques cortafuegos, etc. En la fase final las estructuras propias del edificio evitarán su derrumbamiento si son muy resistentes al fuego (p. 3).

2.2.3 Comportamiento de la madera al fuego

De acuerdo a lo reportado por Sotomayor-Castellanos (2018) la reacción al fuego de un material como la madera se mide mediante la norma UNE-23-103-73, la cual da una

clasificación en relación a su capacidad de combustión. Si efectivamente es combustible como lo es en este caso la madera (puede ser más o menos inflamable) por tardar mucho tiempo o poco en iniciarse la llama, desprendiendo calor abundante, llama larga o corta, etc. En este sentido, se clasificará en 5 clases, desde M-1 a M-5 en inflamabilidad creciente y de acuerdo con la Norma UNE 23-721.

En cuanto a la resistencia al fuego se utilizan las normas UNE-23.093 para estructuras en general y las UNE-23-802 para aquellos que cierran huecos (puertas, ventanas, tabiques, etc.) o la UNE 23.803 para estructuras vidriadas. El comportamiento al fuego de la madera se recoge, comparado con el de otras estructuras, en la norma DIN-4102. En general el comportamiento puede entenderse basado en:

- ✓ Capacidad de combustión
- ✓ Poder calorífico
- ✓ Inflamabilidad
- ✓ Humos y gases nocivos
- ✓ Estabilidad mecánica
- ✓ Aislamiento térmico
- ✓ Estanqueidad a las llamas

Cada uno de estos aspectos permite establecer de acuerdo al tipo de madera cuál será su comportamiento posible frente al fuego y su propagación, además de la preservación del material para conservar la funcionalidad dentro de la estructura.

2.2.4 Protección de la madera

La protección de la madera se ha entendido desde diferentes puntos de vista uno de ellos está relacionado con el comportamiento de la madera ante el fuego por lo que se ha descrito en la literatura de la ingeniería civil las formas en las que se pueden realizar algunos tipos de tratamientos a la madera con el propósito de que resiste al fuego. Es de tener en cuenta, que la madera es un material altamente combustible y un incendio que se origina en materiales que estén adyacentes a la madera, pueden hacer que evolucione de una forma aleatoria en el espacio y en el tiempo en función del volumen de los materiales que pueden ayudar en que la propagación del fuego se dé más rápidamente, o por el contrario, aquellos que a partir del tratamiento de la madera constituyen una disminución de la alimentación del fuego, a través de la madera, en donde el oxígeno juega un papel preponderante (Canosa, Maly, Keil, Tonello, & Giúdice, 2017).

En este sentido, el desarrollo de un incendio hace que los materiales que están siendo consumidos por las llamas puedan tener un comportamiento diferenciador en la estructura en atención a los diferentes procesos que se hayan tenido en cuenta para la protección del material contra el fuego. Sin embargo, juega un papel importante que existan algunos tipos de protección pasiva y activa para la disminución de la propagación del fuego como se describirá más adelante (Jimenez-Florez, 2018).

En adición se puede mencionar que existe una clasificación de la reacción al fuego de un material, normalizado a nivel europeo a través de las Euroclases que incluye dos subsistemas, uno para su aplicación a los materiales de construcción en general excepto revestimientos de suelos y otro específico para suelos (Ipiña, 2017).

Ambos utilizan la designación en las clases: A1, A2, B, C, D, E y F, añadiéndose en el caso de la clasificación de suelos el subíndice FL, y para el resto de materiales añadiendo la calificación relativa a humos (s) y la relativa al goteo de partículas inflamables (d). La clasificación se realiza en función de las prestaciones alcanzadas por el material sometido a un conjunto de ensayos (denominados “Single Burning Item” o SBI), siendo la norma de referencia la UNE-EN 13501-1. “Clasificación de la reacción al fuego de los productos de la construcción y elementos de la edificación. Parte 1: Clasificación utilizando datos de ensayo de reacción al fuego”. El significado abreviado de los códigos es el siguiente:

- ✓ A1 / A1FL No combustible en grado máximo
- ✓ A2 / A2FL No combustible en menor grado
- ✓ B / BFL Contribución muy baja o despreciable al incendio
- ✓ C / CFL Contribución escasa al incendio
- ✓ D / DFL Contribución moderada al incendio
- ✓ E / EFL Contribución significativa al incendio
- ✓ F / FFL Sin datos sobre su comportamiento al fuego

Es así, que los métodos de protección de la madera ante el fuego, tienen el objetivo de disminuir su nivel de combustibilidad e inflamabilidad mediante la aplicación de diversos productos químicos o protegiéndola, en su caso, con otros materiales incombustibles que actúen de pantalla protectora, y que impidan que llegue el calor hasta la estructura de madera. Estos métodos modifican en un sentido muy favorable la reacción al fuego de la madera, permitiendo transformarla en productos con menos contribución al incendio. En el siguiente aparatado se

presenta una descripción de las estrategias de prevención, detección y extinción del fuego más utilizadas en la ingeniería.

2.2.5 Estrategias de prevención, detección y extinción

Todas las medidas que se adoptan para garantizar una larga vida de la madera son tratamientos para la preservación de ésta. Aparte de las medidas estructurales de la madera, hay una serie de diferentes conservantes químicos y procesos, que pueden extender la vida del material y hacer que su uso sea más factible en la ingeniería de estructuras de madera. Estos en general aumentan la durabilidad y resistencia ante el ataque y destrucción de agentes degradantes como el fuego. En términos generales se puede establecer dos tipos de protección de la madera:

1. Protección preventiva por diseño
2. Protección por adición de productos

Independientemente de los efectivos tratamientos adicionales que se le puede realizar a la madera, aún no existe el tratamiento definitivo que mantenga la madera inalterable, por lo que se debe considerar una serie de medidas preventivas a la hora de poner la madera en servicio, y así potenciar la durabilidad natural y añadida de la madera, y reducir los trabajos de restauración y mantenimiento. A esas medidas las denominamos protección por diseño y deben acompañarse de un proyecto adecuado de los detalles constructivos que eviten la penetración del fuego o la retención de humedad al interior de la estructura. En algunos casos la clase de riesgo puede rebajarse mediante un diseño adecuado de los detalles constructivos. Así pues, existen soluciones

económicas que pueden ahorrar gastos innecesarios en los costosos tratamientos químicos (Barreiro & Hirsch, 2011).

Por su parte, la protección por adición de productos se clasifica según su composición en: Composición Química (Hidrosolubles/ Hidrodispersables / Orgánicos Naturales/ En Disolvente Orgánico/ Mixtos), y de tratamiento (Superficial/ Medio/ Profundo), donde los distintos productos deben ser aplicados en dosis y forma adecuada siguiendo un determinado proceso que incluye la preparación de la madera previa a la impregnación que involucra el secado, el maquinado y la limpieza (Nutsch, 1996).

No obstante, se debe tener en cuenta que las edificaciones tienen diversos tipos de materiales entre los que se puede encontrar la madera, por tanto, se han propuesto en el ámbito de la ingeniería civil dos tipos generales de protección contra incendios, a saber:

1. Protección pasiva contra incendios (PFP).
2. Protección activa contra incendios (PFA).

En relación a la protección activa contra incendios se ha descrito que ésta juega un papel de tipo curativo dentro de la edificación y representa todos aquellos sistemas en los cuales se hace la detección y extinción del incendio, a través de un sistema para la atención de incendios compuesto por detectores, sensores, alarmas, rociadores y extintores principalmente, acompañado de la debida señalización de rutas de evacuación que se tengan dispuestas cuando se presenta un tipo de contingencia de este tipo. En adición, el sistema de protección activa es una ruta en la que se interviene de forma automática o humana la atención del incendio (Jimenez-Florez, 2018).

Para el caso de la protección pasiva tiene un papel netamente preventivo en el que todas las medidas que se toman alrededor de la edificación están orientadas no sólo a que la estructura resista un incendio durante un tiempo determinado, sino que además están destinadas a que la contingencia pueda ser reducida en el menor tiempo posible. Para esto se han estimado una serie de medidas constructivas destinadas a la protección pasiva las cuales son:

- ✓ Detener la progresión de los humos.
- ✓ Evitar la propagación de las llamas.
- ✓ Contener los efectos térmicos en el área del desastre.
- ✓ Mantener la estabilidad al fuego de los elementos estructurales.

Todas estas medidas se llaman pasivas porque funcionan sin intervención humana o aporte de energía externa. Su objetivo es permitir la evacuación de las personas y la intervención de los servicios de emergencia, confinando el fuego el mayor tiempo posible en el único espacio donde se declara.

2.2.6 Relación resistencia-temperatura

En cuanto a la relación resistencia-temperatura, Arata, Arrufat, Palacios, & Folie (2001) en un ensayo de laboratorio midieron la resistencia de distintos materiales a diferentes temperaturas para hallar dicha relación. Los investigadores encontraron una relación lineal para materiales conductores, y un gráfico tipo Arrhenius para el termistor. Para el caso de una aleación manganina, no encontramos variaciones con la temperatura. En el caso de la madera,

varios autores como Arata, Arrufat, Palacios, & Folie (2001), Granjo (2009) y Gutiérrez & Gonzalez (2012) establecieron que la conductividad térmica de la madera es relativamente baja debido a su porosidad, y ésta a su vez disminuye a medida que aumenta la densidad de la madera, por lo que la relación estudiada de la madera en el sentido de la veta es el doble que la conductividad en perpendicular a la veta, por cuanto a mayor densidad del material, mayor es su relación de resistencia a la temperatura.

2.3 Marco legal

En Colombia el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, de la mano del equipo técnico del Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial, junto al asesoramiento de la Dirección del Sistema Habitacional, se creó la Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes la cual fue creada por la Ley 400 de 1997, en donde se le dio participación a la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, y se originó el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2012).

En dicho documento normativo, en el título J se estipulan los requisitos de protección contra incendios en edificaciones en donde se establecen los mínimos admisibles de protección contra incendios en edificaciones y similares sobre la base de los siguientes aspectos:

- ✓ Reducir en todo lo posible el riesgo de incendios en edificaciones.
- ✓ Evitar la propagación del fuego tanto dentro de las edificaciones como hacia estructuras aledañas.

- ✓ Facilitar las tareas de evacuación de los ocupantes de las edificaciones en caso de incendio.
- ✓ Facilitar el proceso de extinción de incendios en las edificaciones.
- ✓ Minimizar el riesgo de colapso de la estructura durante las labores de evacuación y extinción.

Por otro lado, el decreto 1077 de 2015 por medio del cual se expide el reglamento único del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, el cual es un documento compilatorio de normas reglamentarias preexistentes que tiene por objeto:

Artículo 1.1.1.1.1 Objetivo. El Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio tendrá como objetivo primordial lograr, en el marco de la ley y sus competencias, formular, adoptar, dirigir, coordinar y ejecutar la política pública, planes y proyectos en materia del desarrollo territorial y urbano planificado del país, la consolidación del sistema de ciudades, con patrones de uso eficiente y sostenible del suelo, teniendo en cuenta las condiciones de acceso y financiación de vivienda, y de prestación de los servicios públicos de agua potable y saneamiento básico (p. 5).

En este sentido, se trazan todas las medidas legales conducentes al aseguramiento de la planificación del territorio y aquellas que están vinculadas a temas de vivienda, ciudad y territorio en todo el país, con el propósito de generar la regulación en aspectos como agua potable, saneamiento básico, sismo resistencia, y además, se establecen los fondos para la promoción y adquisición de la vivienda de acuerdo a la constitución de órganos de asesoría y coordinación tanto internos como externos al Ministerio de Vivienda, que permitan hacer realidad una residencia, la calidad un territorio bien planificado, y unas garantías mínimas para que las edificaciones que se construyan en el país cumplan con los requerimientos mínimos

exigidos en normas complementarias para la construcción. La norma presenta los requisitos de protección contra el fuego de edificaciones y las especificaciones que deben cumplirse en temas constructivos de todos aquellos elementos estructurales y materiales utilizados, con el fin de proteger contra el fuego la estructura acabados y establecer las vías de evacuación y seguridad.

3. Metodología

En el presente apartado se describen los aspectos metodológicos que guiarán el proceso de investigación en cumplimiento de los aspectos científicos trazados por la universidad, y en consonancia con los referentes teóricos en el marco de la investigación.

3.1 Tipo de estudio

El diseño metodológico se basa en un estudio de enfoque cualitativo y tipo descriptivo, en donde mediante un estudio sistemático de la literatura científica se realiza la identificación y análisis de los procedimientos de protección de la madera ante agentes abióticos como el fuego. Este enfoque surge de la necesidad de abordar de manera más compleja los fenómenos, dado que el propósito del enfoque cualitativo es la descripción de la realidad a partir de recolectar, analizar y vincular datos y supuestos cualitativos para responder al planteamiento del problema y objetivos propuestos (Hernández-Sampieri, Baptista-Lucio, & Fernández-Collado, 2010).

3.2 Diseño de la investigación

El diseño es no experimental, de corte transversal, con énfasis en la revisión de tema y establecimiento del estado del arte, que desde la propuesta de Hernández et al (2010) se relaciona con el diseño de investigaciones que permiten considerar variables cualitativas para exponer las relaciones que pueden existir entre el objeto de estudio y la intención de indagación durante un determinado lapso de tiempo, donde se recolectan datos que son únicos para el momento y las

variables consideradas, las cuales tienen incidencia directa sobre las interrelaciones que se establecen por parte del investigador, y que de manera sistemática y empírica no existe manipulación de las variables de forma deliberada, sino que simplemente se exponen dentro de la investigación.

Para desarrollar la presente investigación se establecieron las siguientes fases:

Fase 1: Exploración y contextualización, donde se desarrollan las siguientes acciones:

1. Búsqueda de antecedentes e investigaciones nacionales e internacionales relacionadas con el tema a estudio.
2. Delimitación del problema, antecedentes, contexto, marco teórico, marco conceptual y referencial para la construcción del diseño metodológico.
3. Búsqueda y selección de los instrumentos para la recolección de la información.

Fase 2: Información y tratamiento de datos, donde se desarrollan las siguientes acciones:

1. Recolección de datos.
2. Tabulación de datos.

Fase 3: Análisis y discusión, donde se desarrollan las siguientes acciones:

1. Análisis de los resultados obtenidos.
2. Comparación de resultados con otros estudios.

3. Elaboración del informe final.

3.3 Fuentes de información

Para el desarrollo de la revisión sistemática de la literatura científica para la construcción del estado del arte en relación a los objetivos del presente estudio, se accederá a fuentes secundarias de información disponibles en libros, bases de datos y revistas especializadas que hayan sido publicados desde 2010 a 2019.

3.4 Población y muestra

La población está constituida por la totalidad de artículos, libros e informes sobre el comportamiento de maderas para resistir al fuego y los procedimientos conexos para su protección eficiente ante la flamabilidad, los cuales se encuentran alojados en las bases de datos Scielo, Conicyt, Semantic Scholar, Google académico, Open Journals Systems, Researchgate y Redalyc publicados desde 2010 a 2019. Se identificaron 44.760 trabajos publicados entre 2010 y 2019, de los cuales 23.600 están relacionados con protección de la madera (52,7%), 15.600 a cerca del comportamiento de la madera al fuego (34,9%), y 5.560 sobre comportamiento de maderas desarrolladas para resistir al fuego (12,4%). En la tabla 2 se muestra la relación porcentual de resultados por categoría de análisis.

3.4.1 Criterios de inclusión

Para la caracterización de la información se incluyeron en el estudio las revisiones publicadas desde 2010 a 2019. Asimismo, hicieron parte del análisis los documentos que presenten alguna de las temáticas de referencia: madera y fuego, protección de la madera, flamabilidad de la madera, comportamiento estructural de la madera, resistencia al fuego de la madera y procedimientos para la protección de la madera ante la flamabilidad.

3.4.2 Criterios de exclusión

Se excluyeron todos aquellos documentos de opinión, cartas al editor, comunicaciones informales, memorias de seminarios, y se descartaron aquellos documentos que estuvieran carentes de la estructura científica, y que además hubieran sido publicados antes del año 2010.

3.5 Análisis y recolección de la información

La información se analizó mediante la creación de categorías de información como es usual en este tipo de estudios. Además, la información encontrada se organizó para luego determinar si dichos documentos reflejaban en su contenido los criterios temáticos a cerca de los factores o características que influyen la problemática, mediante la revisión de palabras clave, lectura crítica de los resúmenes y discusión contenida en los mismos, según lo descrito por Hernández et al (2010).

Siguiendo el método propuesto se elaboró una tabla en hoja de cálculo de Microsoft Excel para la revisión, análisis y síntesis de la información recolectada. Los hallazgos corresponden a la búsqueda en base de datos desde el 23 de abril de 2019 a la fecha del 16 de octubre de la misma anualidad, por lo que consultas posteriores bajo los mismos descriptores pueden variar ostensiblemente. La validez de la información se da mediante la fiabilidad de que los datos recolectados aportan información pertinente sobre el fenómeno, evento o situación objeto de estudio.

4. Resultados

En este apartado se presentan los resultados con relación a la revisión sistemática de la literatura en la que se plantea un estado del arte en relación al comportamiento de maderas para resistir al fuego, en donde se han tomado tres categorías de análisis: la primera está relacionada con la protección de la madera, la segunda referente a la resistencia de la madera al fuego, y tercera, en concordancia al comportamiento de maderas desarrolladas para resistir el fuego.

De estas categorías, surge una unidad de análisis en la que se integran los procedimientos para la protección eficiente ante la flamabilidad para el caso de la madera partiendo de la información de mayor relevancia hallada en el proceso investigativo.

4.1 Publicaciones por categorías

Bajo la caracterización de la información realizada mediante la revisión sistemática de la literatura, se encontraron publicaciones sobre el tema de investigación alojadas en las bases de datos Scielo, Conicyt, Semantic Scholar, Google académico, Open Journals Systems, Researchgate y Redalyc; las cuales se hallan dentro de los criterios metodológicos planteados en este documento, donde se identificaron 44.760 trabajos publicados entre 2010 y 2019, de los cuales 23.600 están relacionados con protección de la madera (52,7%), 15.600 a cerca del comportamiento de la madera al fuego (34,9%), y 5.560 sobre comportamiento de maderas desarrolladas para resistir al fuego (12,4%). En la tabla 2 se muestra la relación porcentual de resultados por categoría de análisis.

Tabla 2. *Distribución de publicaciones por categoría*

Categoría	No	%
Protección de la madera	23600	52,7
Resistencia de la madera al fuego	15600	34,9
Comportamiento de maderas desarrolladas para resistir al fuego	5560	12,4
Total	44760	100

Fuente: Autor.

Con el ánimo de especializar la búsqueda se circunscribieron descriptores en los que se indica la categoría de análisis seguida del signo (+) así: <<Protección de la madera + Resistencia de la madera al fuego + Comportamiento de maderas desarrolladas para resistir al fuego>>, con lo que se obtuvo un total de 1.130 fuentes que están relacionadas con la unidad de análisis, las cuales se hallan alojadas en distintas bases de datos usando el gestor de referencias de Google Académico.

Del total de referentes obtenidos se seleccionaron de manera preliminar 113 fuentes en forma aleatoria para la revisión de títulos y resumen con el fin de establecer el nivel de conveniencia y oportunidad bajo los siguientes criterios: Pertinencia (PE) y Objeto de Estudio (OE). De las 113 fuentes filtradas por PE y OE se incluyeron para la revisión textual 55 artículos, de los cuales el 34,55% corresponden a fuentes asociadas al comportamiento de la madera al fuego, el 18,18% versan sobre la resistencia de la madera al fuego, el 38,18% están vinculados a los procedimientos de protección efectiva de la madera contra el fuego, y por último, el 9,09% de los artículos tienen que ver con el comportamiento de maderas desarrolladas para resistir el fuego, tal como se muestra en la figura 1. Además, atendiendo a la importancia del tema se incluyó una revisión sobre del *Handbook: “Wood Deterioration, Protection, and Maintenance”*, de Reinprecht (2016) publicado por: Wiley Blackwell.

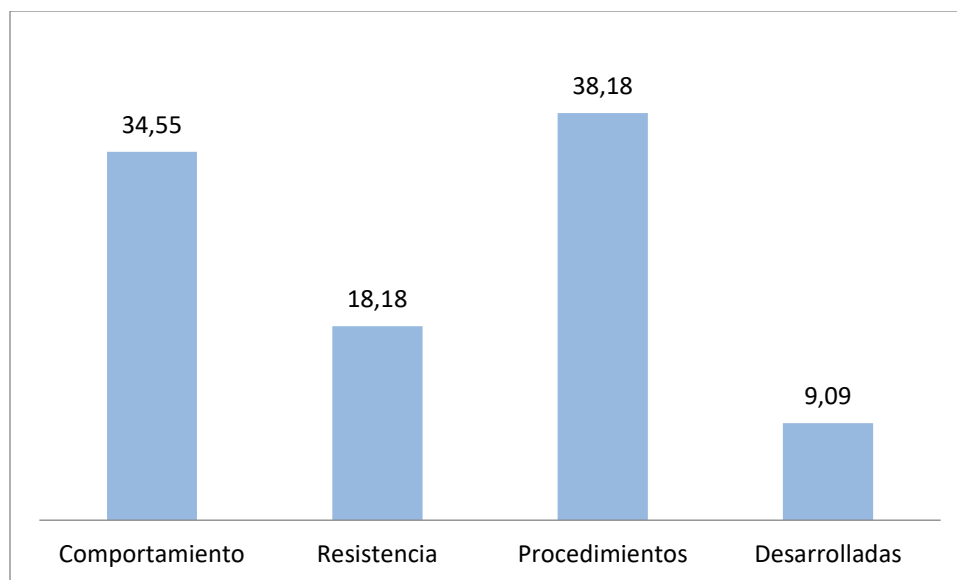


Figura 1. Distribución porcentual de artículos por categorías
Fuente: Autor.

4.2 Comportamiento de la madera al fuego

De acuerdo a lo descrito por Reinprecht (2016), la madera se enciende y quema fácilmente, a causa de su composición química, ya que se compone de ~ 49–51% de carbono, 43–44% de oxígeno y 6–7% de hidrógeno. El alto contenido de energía en los enlaces covalentes de los polisacáridos de madera y la lignina se acumula durante la fotosíntesis (es decir, durante la producción de glucosa a partir de dióxido de carbono y agua) y durante las reacciones endotérmicas posteriores (es decir, durante la transformación de glucosa en polisacáridos y lignina).

Esta energía química puede liberarse retrospectivamente de la madera al suministrar la energía de activación necesaria. Por lo tanto, la ignición y la combustión de la madera es el proceso opuesto al del origen de la madera, y sus componentes con altos valores de energía

química se dividen gradualmente en gases inflamables y luego en dióxido de carbono y agua, lo cual está en consonancia por lo reportado por Hernández (2010).

Adicionalmente, desde el punto de la descomposición térmica de la madera frente al fuego, Reinprecht (2016), Garay (2010) y Rojas (2018) asienten al decir que es un conjunto de reacciones químicas caracterizadas por despolimerización y deshidratación, las cuales inician por el calentamiento y logrando la energía de activación a temperaturas inferiores a 66°C, donde las reacciones químicas de la madera en el aire no tienen lugar.

No obstante, Reinprecht (2016) menciona que a temperaturas de 66°C a 100°C algunos aspectos químicos y físicos pueden tener lugar dependiendo de la duración de la calefacción de la madera, que por lo general tienen una importancia insignificante para la estructura y las propiedades de la madera desde un punto de vista práctico. Sin embargo, la interrupción térmica más aparente de los componentes de la madera se produce solo a temperaturas superiores a 150°C, cuando las hemicelulosas se descomponen inicialmente, luego la celulosa, mientras que la más estable térmicamente es la lignina. El proceso puede apreciarse en la figura 2.

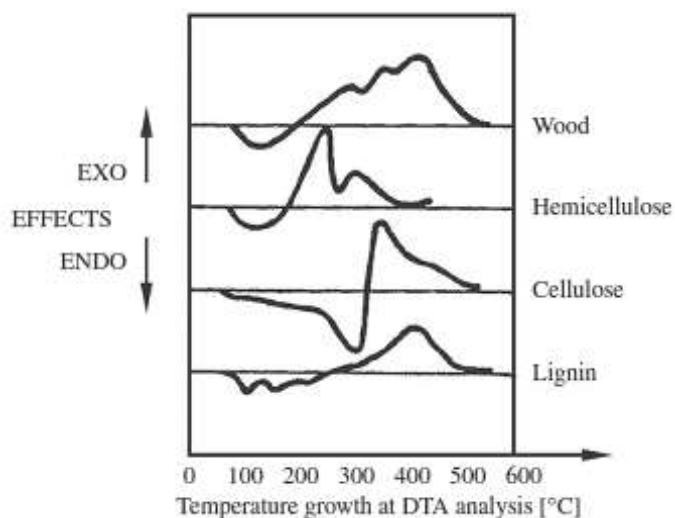


Figura 2. Efectos de la descomposición térmica de la madera y sus componentes
Fuente: Reinprecht (2016).

En consecuencia, el conocimiento general de la descomposición térmica de los polímeros de la madera parte del análisis termal diferencial (ATD), termo-gravimetría y termo-gravimetría diferencial, espectro cromatografía de masas del gas, RMN-C, espectroscopia infra roja Fourier, entre otros análisis termo-químicos, termo físicos y de termo análisis, quienes dan cuenta de los fenómenos comportamentales de la madera hacia el fuego.

Rojas (2018) por su parte considera que este tema no sólo debe ser observado a la luz de las ciencias básicas, sino también desde un punto de vista normativo, donde se debe dar especial importancia a la reacción al fuego de los materiales, para lo cual se recomienda que se exija una reacción al fuego equivalente a C-s2,d0 de las Euroclases, en el que la resistencia al fuego de la estructura no debería cumplir con ninguna clasificación en base a la norma NCh 935/1, mientras se asegure la evacuación de los ocupantes en su interior.

En adición, Terzi et al (2011) corroboran el abordaje de Reinprecht (2016) y Rojas (2018) al exponer que tras la combustión de la superficie se origina una capa exterior carbonizada, que protege a otra capa interior contigua en la que se produce la pirolisis, donde aun siendo expuesta a llama directa, no se producirá la ignición hasta que no llegue a temperaturas entorno a los 300°C (Ver figura 3).



Figura 3. Temperatura de ignición con y sin llama directa
Fuente: Reinprecht (2016).

En consonancia, Sotomayor (2018) evaluaron por ultrasonido y protocolo de resistencia al fuego cinco especies diferentes de madera originaria de México, dando como resultado el establecimiento de una densidad aparente de la madera correlaciona con la pérdida de masa. La densidad aparente de la madera después de la exposición al fuego, presentó una fuerte correlación con la densidad de la madera antes de ser expuesta al fuego.

A cerca del comportamiento de la madera ante el fuego, Martínez et al (2017) destacan la importancia de ahondar en el tema de la descomposición térmica ya que esto influye en la integridad de la sección resistente, por lo que el componente estructural de la madera se ve reducido. Terzi (2011), Sotomayor (2018) y Martínez et al (2017) concuerdan en que un aspecto relevante a estudiar en el comportamiento a fuego de las estructuras de madera son las uniones entre los elementos, a la luz de la normatividad Europea y Española, las cuales dan soporte técnico y directrices claras para determinar el comportamiento de uniones de madera cuando se encuentran sometidas a una curva de calentamiento normalizada, tal como lo señala la norma UNE-EN 1363-1

Martínez et al (2017) para determinar dicha curva de calor, se valieron de la realización de un ensayo en el que midieron la temperatura en el interior de la madera utilizando 22 termopares de temperatura tipo K, repartidos a lo largo de conjunto de la vigueta y unión viga-vigueta. Para determinar el comportamiento de la madera, se procedió a realizar el ensayo seguido de acuerdo con la norma UNE-EN 1995-1-2, UNE-EN 1363-1, y UNE-EN 1991-1-2, las cuales permiten conocer el comportamiento de elementos estructurales de madera cuando se encuentran sometidos a fuego en condiciones definidas de calentamiento. En la figura 4 se aprecian los valores de temperatura registrados en la cola de milano donde se produce el fallo.

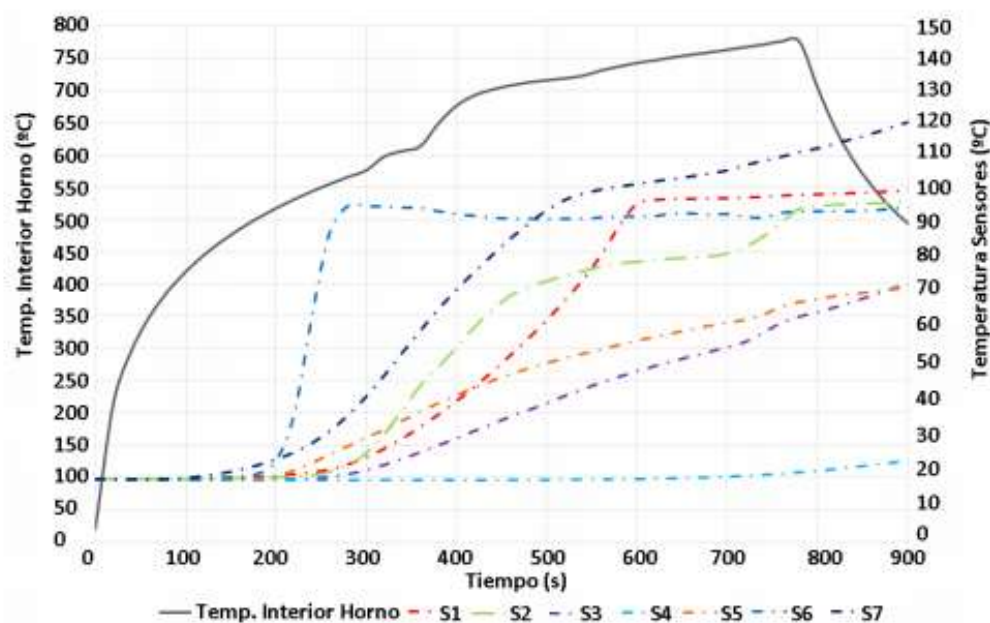


Figura 4. Temperaturas registradas por termopares
Fuente: Martínez et al (2017).

Por su parte Etxebarria (2016) analizó diferentes especies de madera en su comportamiento frente al fuego, partiendo de considerar que el proceso de carbonización tiene variaciones comportamentales entre una y otra especie, en base a las características de cada tipo de madera, por lo que es necesario analizar con un software el comportamiento de un elemento de madera estructural expuesto al fuego, que para el caso particular se recurrió a una viga de 5 metros de largo, donde los resultados del cálculo arrojaron que el oxígeno gastado en la quema de parte de la madera por encima de los 280°C libera energía alrededor del 57-60%, que es el rango cercano a la temperatura de ignición reportado por Reinprecht (2016), quien además menciona que la descomposición a esta temperatura es una termo-oxidación exotérmica que ayuda a producir más calor que junto a la presencia de radicales libres y gases producto de la flamabilidad se genera mayor calentamiento de la estructura.

Por otro lado, en el caso del bambú como y su comportamiento estructural en condiciones de incendio tiene un espacio especial en la presente investigación, en atención al apogeo que este material constructivo ha tomado en los últimos años en Colombia y el Caribe. Ya Soria & Guerrero (2019) mencionan que el bambú es uno de los materiales usados desde la más remota antigüedad por el hombre para aumentar su comodidad y bienestar. En el mundo de plástico y acero de hoy, el bambú continúa aportando su centenaria contribución y aun crece en importancia. Los programas internacionales de cooperación técnica han reconocido las cualidades excepcionales del bambú y están realizando un amplio intercambio de variedades de esa planta y de los conocimientos relativos a su empleo, considerando que:

El bambú es una de las plantas más sorprendentes de la naturaleza, se conoce como “la planta mil usos” pues a partir de él se pueden obtener: alimento, ropa, material para construcción, celulosa para papel y medicinas; igual que otras plantas, protege el suelo y captura bióxido de carbono. Pertenece a la familia de las gramíneas, igual que los cereales (avena, maíz, trigo y arroz), los forrajes, la caña de azúcar y otros pastos. Su altura varía desde unos pocos centímetros – como en el género *Radiella*– hasta 40 m en el caso de especies gigantes –como *Dendrocalamus giganteus*– y algunas de éstas llegan a crecer hasta 100 cm por día, como *Guadua angustifolia* que completa su crecimiento total de 20 m en menos de cinco meses. Puede ser más resistente en tensión y en compresión que algunas maderas; las fibras de un haz de vasos pueden llegar a resistir hasta 12,000 kg/cm² en tensión a lo largo de su tallo, sin embargo se cortan transversalmente con relativa facilidad (p. 87).

En seis países latinoamericanos, varios asiáticos y cada vez más en el continente europeo se adelantan hoy proyectos destinados a ensayar y seleccionar variedades sobresalientes de bambú recolectadas en todo el mundo, y también a determinar al lugar potencial de ese material en la economía locales. Estos proyectos, que ahora forman parte del programa de cooperación técnica del desarrollo del bambú han venido realizándose durante varios años y algunos de ellos

han llegado ya a un grado de desarrollo en el que la multiplicidad de usos del bambú ha llegado a ser una estimulante realidad.

Gutiérrez et al (2018) en un estudio en *Guadua angustifolia Kunth*, una especie de bambú que ha sido ampliamente utilizada en la construcción, determinaron que la *G. angustifolia* experimenta cambios en sus dimensiones, resistencia y rigidez debido a la variación del contenido de humedad. El punto de saturación de las fibras (PSF) se alcanza cuando a un determinado contenido de humedad el material no presenta cambios dimensionales ni variaciones en la resistencia mecánica. Para determinar el PSF de *G. angustifolia* se analizaron probetas de la parte inferior, intermedia y superior de la guadua. Se utilizaron dos metodologías: el primer método midió la variación dimensional, encontrando que el PSF está alrededor de 34.05 %; el segundo determinó la variación de la resistencia a la compresión paralela, encontrando que el PSF está alrededor de 34%. Por último, se presentaron los factores de modificación de la resistencia a compresión para diferentes contenidos de humedad, así como la ecuación de expansión lineal del material.

De acuerdo con Gutiérrez (2019) se pudo establecer que ciertas propiedades mecánicas de la madera vinculadas a especies como el bambú permiten que de acuerdo al clima, suelo y ubicación pueda tenerse grandes diferencias entre el comportamiento al fuego frente a otro tipo de Maderas o a otro tipo de ambientes. No obstante, la característica cilíndrica del bambú y densidad de sus compuestos permite generar una sección de resistencia que posibilita una disminución hasta en un 30% de su comportamiento al fuego, debido a la acumulación de fibras de alta resistencia en la zona externa no sólo le dan una particularidad estructural en relación a la tracción, flexión y elasticidad, sino también a la carga que puede recibir de calor.

Este mismo autor menciona que el bambú debido al alto grado de ácido silícico de la corteza y a su alta densidad, se clasifica al bambú en DIN 4102 (norma industria alemana) como un material poco inflamable. La susceptibilidad al fuego depende en particular de las posiciones de las unidades de la construcción, las dispuestas en horizontal son menos susceptibles que unidades verticales o diagonales. Con una caña de bambú horizontal las llamas se extienden como anillo al nudo siguiente. Allí el fuego se apaga, ya que la llama no puede conseguir el nudo ni el diafragma al próximo entrenudo. Si el entrenudo estalla en grietas transversales o longitudinales, el oxígeno entrante contribuye con la combustión, con las grietas transversales se reduce la capacidad de carga, y si se llena un palo de bambú con agua y se coloca fuego debajo de ella, esta puede llegar a hervir, debido a que el palo de guadua puede resistir temperaturas de 400°C.

Por su parte, Janssen describe la eficiencia de energía de producción comparándola con otros materiales:

Tabla 3. *Eficiencia energética del bambú*

Baustoff	Energía para la producción MJ/kg	Densidad kg/m ³	Energía para la producción MJ/m ³	Sigma kN/cm ²	Relación de energía por unidad sigma
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(4)/(5)
Acero	30,0	7800	234.000	1,600	150.000
Concreto	0,8	2400	1920	0,080	24.000
Madera	1,0	600	600	0,075	8.000
Bambú	0,5	600	300	0,100	3.000

Fuente: Jansen (1981).

El material de bambú con sus características mecánicas y técnicas es mucho mejor que la madera usado en construcción; pero solamente un uso y tratamiento adecuado, artesanal y de buen acabado, dejan venir esas ventajas al efecto. En los años ochenta el holandés Jules Janssen comparó el nivel del conocimiento de las características mecánicas y técnicas, con la situación de la construcción en madera hace 100 años atrás, cuándo su uso era artesanal y tradicional y llevó a construcciones estables, pero complicados y derrochadores.

El paso de un material de baja tecnología a pasar a ser un material innovador, como ya sucedió con la madera, para el bambú su momento se está acercando, ya que desde una investigación profunda se ha conducido abajar la necesidad del material y desarrollar estándares para un uso inteligente de este nuevo material.

4.3 Resistencia de la madera al fuego

Desde este aspecto, Ortiz (2018) realizó una revisión de estado de arte sobre la resistencia de la madera al fuego y la cotejo con la normativa Chilena para la construcción en madera, ayudando con esto al fomentar su uso adecuado y seguro; sobre la base de revisar los resultados de la mayor cantidad posible de ensayos de resistencia de la madera al fuego realizados en Chile, a estructuras divisorias horizontales y verticales con entramado de madera.

Este trabajo concluye que los materiales aislantes más utilizados son: OSB, yeso-cartón, fibrocemento, lana mineral y de vidrio, y las características más comunes de los entramados de madera es escuadría 50x75[mm] aprox.; y que de los métodos de deducción internacional para estimar la resistencia al fuego, se destaca el de cálculo de resistencia al fuego de directa aplicación CAM (Component Additive Method).

Asimismo, Ortiz (2018), Fonseca (2011) y Luque (2016) han establecido que los ensayos de resistencia al fuego de la madera incluyen usualmente en el tipo de ensayo, tipo de elemento, tipo y características de la solución constructiva, resistencia al fuego de las alternativas de solución, tipo de falla, y características especiales de la madera. Luque (2016) asiente al decir que la resistencia de la madera al fuego tiene una serie de variables como espesor, área y volumen que juegan un papel preponderante en su respuesta integral a la flamabilidad, como se muestra en la tabla 4 del estudio de carga de fuego para el caso reportado, partiendo que “*m*”, coeficiente de combustión tiene en cuenta la fracción del combustible que arde en el incendio. En los casos en los que el material incendiado sea de tipo celulósico (madera, papel, tejidos, etc.) puede tomarse $m = 0,8$. Cuando se trate de otro tipo de material y no se conozca su coeficiente de combustión puede tomarse $m = 1$.

Tabla 4. *Carga de fuego calculada para techo de madera*

Espesor [m]	Área [m ²]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	M [kg]	M_i [MJ/kg]	Q_{fi} [J]	Q_{fi} [MJ]
0,01	314	3,14	madera 500	1570	17,5	27475	27,475

Fuente: Luque (2016).

Por su parte, Alongi & Malucelli (2015) manifiestan que un aspecto evidenciado en la resistencia de la madera al fuego está asociado a la degradación de los sustratos de celulosa ante la respuesta térmica en el cual al estar expuesto al calor, la madera tiene una pérdida significativa de peso lo cual se asocia a una alta extracción de los contenidos celulares de la especie y tipo de madera, en dónde se pueden presentar desde la ignición pérdidas hasta del 14% a los 160 grados centígrados, por lo que se debe recordar que el mayor componente de lignocelulosa que está presente en las fibras de la composición celulítica y de lignina de la hemicelulosa en la madera,

hace que haya una diferencia significativa en el aislamiento térmico de la madera como estructura, en donde las pérdidas al exponerse al calor por encima del 11% hacen que su área transversal se vea afectada, por lo que la prevención de la degradación por el impacto térmico es uno de los aspectos más importantes cuando se tiene que pensar en la resistencia de la madera al fuego.

De igual forma, se debe entender muchas variables del efecto del fuego sobre la madera y de aquellas que tienen que ver con la resistencia del propio material ante los cambios térmicos, los cuales están asociados básicamente a aspectos químicos y físicos, pero que principalmente para los estudios realizados por estos autores se asocian a una comprensión minuciosa de la biodegradación y la caracterización de las estructuras que están involucradas en todo el proceso bioquímico. Es importante establecer, que la fibra vegetal de la madera tiene unas características de peso, aislamientos, flexibilidad y contracción que de acuerdo al tratamiento que se le den para su uso estructural, va a tener una respuesta importante ante agentes bióticos y abióticos que la ataquen.

Sotomayor (2018) evaluó probetas de madera de *Tabebuia rosea*, *Andira inermis*, *Juglans pyriformis*, *Quercus spp.* y *Cordia elaeagnoides*, con las cuales determinaron la densidad aparente, la velocidad de onda, el módulo dinámico y la disminución de la masa, después de las pruebas de reacción al fuego en las cinco especies, con lo que se observó que la pérdida de masa es inversa a la densidad aparente de la madera. La velocidad de onda no varía significativamente antes y después del tratamiento con fuego, y el módulo dinámico disminuye proporcionalmente a la pérdida de masa.

En consonancia, Castellanos & León (2018) establecieron la densidad de la madera, el tiempo de ignición, la pérdida de masa y su velocidad; determinados en probetas de pequeñas

dimensiones de las especies *T. plicata* y *A. saccharum*, quienes realizaron pruebas de reacción al fuego, donde se evidenció que la mayor densidad de *A. saccharum* produjo que el tiempo de ignición fuera mayor, comparativamente con el de *T. plicata*. Por el contrario, la pérdida de masa y su velocidad fueron menores. De tal forma que, estadísticamente, los resultados de cada especie se diferenciaron. Las magnitudes de los parámetros determinados en *T. plicata* y *A. saccharum* son similares a los de maderas mexicanas. Igualmente, la reacción al fuego en las especies *T. plicata* y *A. saccharum* siguió también las mismas tendencias para tiempos de exposición análogos a otras investigaciones.

4.4 Comportamiento de maderas desarrolladas para resistir el fuego

En relación al comportamiento de maderas desarrolladas para resistir el fuego López et al (2018) consideran que los residuos de madera y termoplásticos pueden ser usados para producir nuevos productos con mejores propiedades físicas y químicas, por lo que desarrollaron una investigación para evaluar las propiedades ignífugas de tableros de madera plástica elaborados a partir de residuos madereros (aserrín) de diferentes especies forestales (*Pinus caribaea*, *Pinus cubensis*, *Cedrela odorata*, *Talipariti elatus* y *Eucalyptus sp.*), termoplásticos reciclados (polietileno de baja y alta densidad, tereftalato de polietileno y polipropileno), aditivos químicos (carbonato de calcio, ácido esteárico, estearato de calcio, estearato de zinc y agente de liga) y tetrabrik como retardante de llama.

Los tableros fueron producidos a escala de laboratorio y procesados mediante extrusión, a los cuales se les aplicaron ensayos de reacción y resistencia al fuego según indicaciones de la Norma Europea (UNE EN) 13823. Los tratamientos desarrollados mostraron buena respuesta en

cuanto a reacción y resistencia al fuego, en especial con la extracción de la resina a la madera de las especies de pino que permitió que los tableros mejoraran sus propiedades ignífugas.

En contraste, Martínez et al (2018) realizó un estudio similar al de López et al (2018) encontrando resultados comparables que dan cuenta de la calidad, pertinencia y beneficios de la producción de tableros de madera plástica producidos con diferentes especies forestales y termoplásticos reciclados, que resultan en ofrecer una alta resistencia al fuego. Se estableció que los niveles más altos en cuanto a los efectos del fuego se pueden alcanzar mediante la mezcla de todas las materias primas en proporciones equitativas, las cuales aportan a los tableros mejores propiedades. En la tabla 5 se muestran los ensayos realizados por estos dos estudios en relación al material desarrollado. En adición, en la figura 5 se muestra el proceso tecnológico para la producción de tableros de madera plástica con propiedades ignífugas.

Tabla 5. *Tratamientos evaluados Vs composición de material utilizado*

Tratamientos	Composición de material utilizado
Testigo	Tablero de madera plástica comercial*
T1	Tablero de madera plástica con madera de <i>Pinus caribaea</i>
T2	Tablero de madera plástica con madera de <i>Pinus cubensis</i>
T3	Tablero de madera plástica con madera de <i>Cedrela odorata</i>
T4	Tablero de madera plástica con madera de <i>Talipariti elatus</i>
T5	Tablero de madera plástica con madera de <i>Eucalyptus</i> sp.
T6	Tablero de madera plástica con mezcla de las especies citadas

Fuente: Martínez et al (2018).

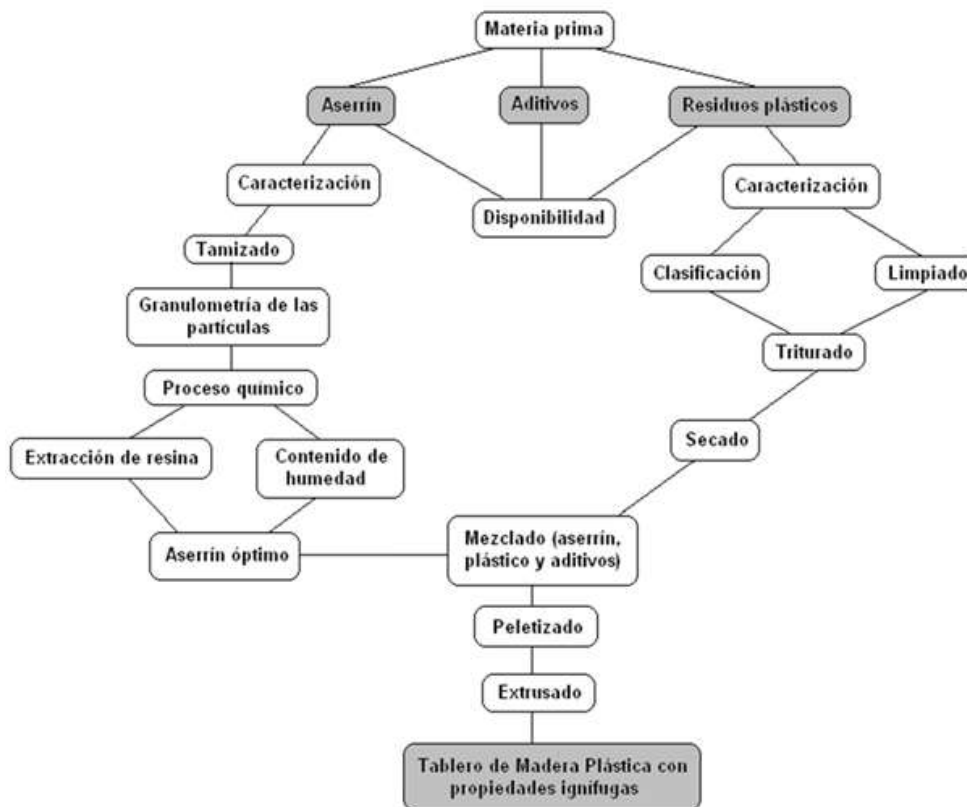


Figura 5. Flujo del proceso de tableros de madera plástica con propiedades ignífugas Fuente: López et al (2018).

Por otro lado, Majano (2014) plantea un modelo en el que madera termo tratada la cual es modificada a través de procesos térmicos a elevadas temperaturas obtiene una mayor estabilidad dimensional y durabilidad sin necesidad de la utilización de productos químicos que lesionan el medio ambiente. Este tipo de tratamiento maderero modificado ha sido usado en coníferas las cuales son usadas en ambientes exteriores y de elevada humedad como sucede en edificaciones en Estados Unidos y Europa, en donde constituyen elementos de revestimiento no estructurales.

En este sentido, la madera termo tratada de frondosas para uso estructural a partir de fresno (*Fraxinus excelsior L*) y haya (*Fagus sylvatica L*), permitió considerar que pueden ser utilizados en estructuras internas en donde se pueda generar una mayor durabilidad de la madera

y su respuesta ante factores mecánicos y químicos. Desde este punto de vista, pruebas de fractura mecánica y de resistencia al fuego permitieron establecer que la madera respondía a un modelo elástico en el que su comportamiento determina una acomodación a los eventos físicos y térmicos intensos estructurales primarios en la que con la aplicación de algunos elementos secundarios se aumenta su fiabilidad global.

Por último, Merk et al (2015) desarrollaron materiales de madera híbridos con retardo al fuego mejorado mediante mineralización bio-inspirada en el nivel nano y sub-micrónico, bajo un enfoque de calcificación artificial para la madera, que se dirige principalmente a la estructura de la pared celular nanoporosa difícilmente accesible en lugar del sistema de huecos del tamaño de micras de la luminaria celular. CaCO_3 se puede depositar con este método en el interior de la estructura de madera, donde la mineralización de la arquitectura de la pared de celdas de madera con CaCO_3 ofrece una alternativa ecológica a los sistemas ignífugos convencionales.

Teniendo en cuenta que la pirólisis de celulosa, es decir, la descomposición térmica representa la mayor liberación de calor en la combustión de la madera, lo que implica la combustión en llamas de los volátiles en la fase gaseosa, así como la descomposición del carbón por combustión ardiente o incandescente, se han adoptado sistemas clásicos ignífugos de Fosfato de amonio, boro, sílice o basados en azufre, que influyen químicamente en los procesos de pirólisis acelerando la deshidratación y la carbonización, inhibiendo la producción de gases volátiles inflamables o fomentando la formación de recubrimientos aislantes o capas de carbón.

Sin embargo, muchas de estas formulaciones ignífugas presentan serios riesgos ambientales y de seguridad debido a la liberación de compuestos tóxicos o cancerígenos durante incendios accidentales, procesamiento, reciclaje y uso. En este contexto, un mineral inerte y benigno para el medio ambiente, como el Carbonato de Calcio (CaCO_3), representa una

alternativa ecológica a los retardantes de llama clásicos. Al incorporar CaCO_3 en la estructura de la pared de la celda de madera, la estabilidad térmica se mejora mediante un mecanismo diferente, es decir, gases liberados en la descomposición endotérmica de minerales hidratados diluirá y enfriará la mezcla de gases de pirólisis inflamables.

Por lo tanto, para la calcificación artificial de la madera, en particular del abeto (una madera blanda) y la haya (una madera dura), se adaptó un método originalmente propuesto para la síntesis de micropartículas ACC en soluciones acuosas. Este enfoque consiste en la hidrólisis alcalina de precursores de carbonato de dimetilo ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$) en presencia de iones de calcio dentro de la estructura de la pared celular. Inducido por un cambio de pH, el dióxido de carbono gaseoso evoluciona in situ, por lo tanto, los gradientes de concentración a través de la muestra a granel y una rápida precipitación mineral en la luminaria de madera se eluden en gran medida.

4.5 Procedimientos preventivos y correctivos para la protección eficiente ante la flamabilidad

En relación a los procedimientos para la protección eficiente de la madera ante el fuego, Garay & Henríquez (2010) compararon en tableros a base de madera y en madera sólida de pino radiata el efecto de una pintura retardante de fuego y testigos sin pintar, con el propósito de discriminar entre tipos de tableros y comparar con respecto a la madera sólida. Los tableros ensayados fueron: Contrachapado estructurales de Pino radiata D. Don, Oriented Strand Board (OSB), Medium Density Fiberboard (MDF), Hard Board (HB) y tableros de partículas, los que fueron pintados superficialmente con pintura retardante de llama y comparados con tableros sin

protección. Se incluyó en el estudio, madera de *Pino radiata* D. Don con y sin retardante de llama.

El análisis realizado evidenció que el comportamiento de los tableros frente al fuego tiene una disminución de la resistencia directa y mejora en las características ignífugas de la madera disminuyendo el índice de carbonización junto a un incremento en el punto de ignición, lo que conlleva a una disminución del desplazamiento del fuego y penetración de la llama. En este sentido, dentro de los tableros ensayados el contrachapado obtuvo el mejor desempeño con menor daño de partículas al ser comparado con MDF a la llama directa, aunque de otro lado, el comportamiento de menor eficiencia se evidenció en los tableros de HB, como se muestra en la figura 6.

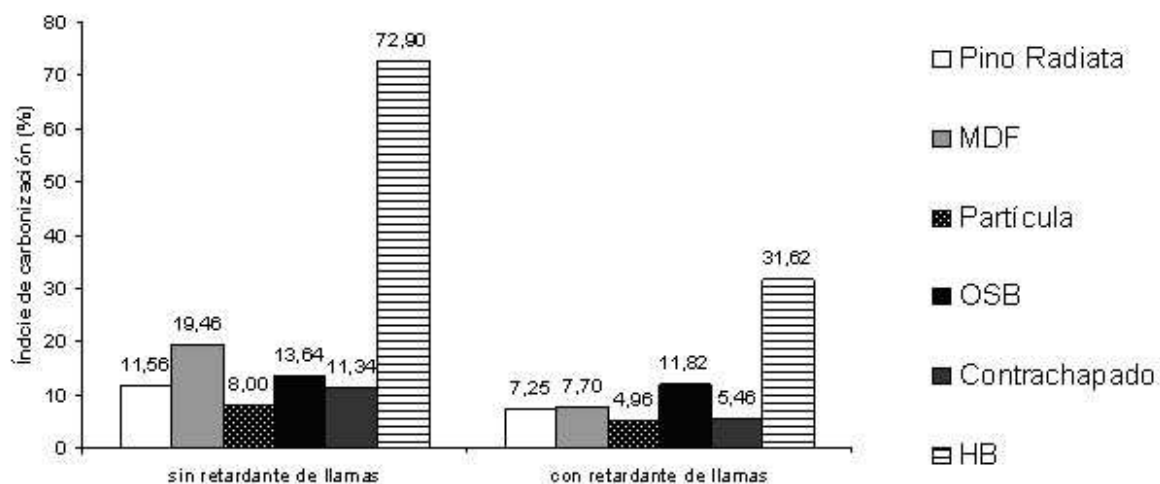


Figura 6. Comparación de índices de carbonización
Fuente: Garay & Henríquez (2010).

Al respecto Reinprecht (2016) menciona que los ignífugos reducen la inflamabilidad de la madera y otros materiales inflamables, pero los retardantes de fuego de los materiales de madera suprimen la descomposición térmica y la quema de madera con los consiguientes efectos físicos

y químicos, creando una capa de aislamiento masivo, que restringe la entrada de oxígeno a la madera y la transferencia direccionalmente opuesta de los gases inflamables desde la madera.

En este sentido, Reinprecht (2016), García-Zumaquero (2016) y Arteaga & Picasso (2018) mencionan que con los retardantes se crean una capa de aislamiento térmico, que impide la entrada de calor de las fuentes térmicas externas a la madera; es decir, ya sea de las pinturas intumescentes sintéticas después de su formación de espuma y carbonización, o de la madera en sí, que en presencia de sustancias catalíticas se convierte en carbón.

Daniliuc et al (2012) reportan que en su experiencia investigativa han encontrado que los ignífugos diluyen gases inflamables, que se escapan de la madera durante su descomposición térmica, reduciendo la concentración de oxígeno en la zona activa, mientras que suprimen el curso de las reacciones de termo-oxidación exotérmica directamente, y también en el revestimiento de gases inflamables sobre sus superficies.

De esta manera, varios autores mencionan que se activan reacciones endotérmicas, en particular reacciones de deshidratación, y al mismo tiempo apoyan la generación de una capa de aislamiento térmico de carbón y, por el contrario, suprimen la generación de gases inflamables, evitando la oxidación total del carbón a dióxido de carbono, prescindiendo así del brillo exotérmico del carbón, que es una fuente potencial de otras llamas (Stark et al, 2010; Arao et al, 2014).

En consonancia, Terzi et al (2011) en relación al comportamiento de la madera partieron de evaluar el rendimiento al fuego y resistencia a la descomposición de madera maciza y madera contrachapada tratada con retardantes de fuego, mediante la cuantificación de calor por medio de calorímetro para hallar el índice de propagación de la llama (FSI) en la prueba del túnel Steiner (ASTM E 84), en muestras tratadas con compuestos de amoníaco cuaternario (AC) y retardantes

de fuego comunes (RC), y un grupo control sin tratamiento. Con esta investigación se pudo establecer que las muestras manejadas con AC y RC mostraron tasas de liberación de calor más bajas que el grupo control, a la vez que mostraron tasas de descomposición más bajas al aplicarse el protocolo AWPA E 10.

Esto se contrasta con los hallazgos de Ladino (2019) quien luego de someter diferentes materiales al fuego (entre ellos la madera), estableció que la velocidad de descomposición de los materiales aumenta en relación a la tasa de calor durante unos lapsos de tiempos específicos, los cuales se pueden apreciar físicamente en cambios de aspecto, deformidad y fisuras que se van desarrollando, para posteriormente originarse la disminución de la resistencia mecánica, descomposición y propagación del fuego.

En adición, Fonseca (2011) plantea que una alternativa usada comúnmente en Europa y Estados Unidos para la protección de la madera ante la flamabilidad, resulta de la combinación con otros materiales con índices elevados de resistencia al calor como alternativa óptima para evitar accidentes por fuego. En este caso particular se recomienda la combinación con materiales cerámicos y pétreos que en general tengan buena resistencia al ataque por fuego.

Reinprecht (2016) acota también, que de los efectos físicos de los ignífugos se destaca la restricción de la transferencia de masa mediante la creación de capas masivas no permeables (de oxígeno a la madera y de gases inflamables, como metano y alcoholes, desde la madera: en las superficies exteriores de la madera (p. Ej., Por vasos de agua fundibles, a base de sodio) y silicatos de potasio, o también por pinturas intumescentes); dentro de la madera en las capas S 3 de sus paredes celulares (por ejemplo, boratos fundibles, como H_3BO_3 y $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$).

Así pues, Reinprecht (2016) y Salazar & Sequeira (2015) indican que la restricción de la transferencia de calor por espumas sólidas de aislamiento térmico intumescente creado a partir de pinturas o láminas intumescentes en superficies de madera a temperaturas superiores a 150 ° C, tienen una estructura microporosa que es fuerte, no inflamable y tiene un efecto de aislamiento térmico. Dichas espumas protegen las superficies de la madera durante un tiempo bastante largo (a veces hasta 30 minutos) contra el fuego o el impacto del calor radiante.

Se ha determinado que su factor de expansión, es decir, la relación del grosor del sólido espuma al grosor inicial de la pintura: ~ 50: 1. En la práctica, es deseable un espesor de espuma de al menos 5 mm, que se puede lograr con 300–500 g de pintura por metro cuadrado de madera, donde las pinturas y láminas intumescentes contienen los componentes, que a altas temperaturas crean gases no inflamables y espuma sólida. En la tabla 6 se presentan algunos preservantes para la protección de la madera de acuerdo a su composición.

Tabla 6. *Algunos preservantes para la protección de la madera.*

Wooden composite	Preservatives
Glued lamella wood (glulam)	ACQ compounds CuNs IPBC Creosotes
Plywood	ACQ compounds Boroglycols Triazoles (propiconazole, tebuconazole, etc.) Pyrethroids (bifenthrin, deltamethrin, permethrin, etc.) Imidacloprid
Oriented strand board (OSB)	Zinc borates CuNs IPBC Pyrethroids
Particleboard (PB)	Fire retardants Pyrethroids
Fibreboard (FB)	Fire retardants Zinc borates and H ₃ BO ₃
Wood–plastic composites (WPC)	Zinc borates

Fuente: Reinprecht (2016).

Pedieu et al (2012) por su parte, determinaron el rendimiento ignífugo de los tableros de partículas de madera tratados con tres porcentajes 8, 12 y 16% de ácido bórico, donde las propiedades ignífugas se midieron de acuerdo con el método de prueba estándar ASTM D3806 de evaluación a pequeña escala de pinturas ignífugas (método de túnel de 2 pies). Los tableros de partículas tratados con ácido bórico al 16% mostraron las mejores propiedades ignífugas, particularmente en términos de pérdida de peso, velocidad de propagación de la llama y tiempo de post-llama. El uso de partículas de corteza interna de abedul blanco como dispersante también redujo la pérdida de peso del tablero de partículas durante las pruebas de fuego. El uso de ácido bórico no solo disminuyó la velocidad de propagación de la llama, sino que también mejoró en gran medida la unión interna y la hinchazón del espesor de los tableros de partículas fabricados sobre los controles.

En contraste Jian et al (2010) estudiaron los efectos de la acción retardante de llama de la madera tratada con retardantes obtenidos del ácido de fósforo, pentaeritritol, urea y trietanolamina mediante condensación de copolio. El retardo de llama se caracterizó por limitar el índice de oxígeno (LOI), y el método de Broido se utilizó para evaluar la cinética de la descomposición térmica en madera no tratada y tratada, donde los resultados mostraron que agregar el retardante de llama disminuye la energía de activación térmica en un alto grado de degradación, lo que lleva al aumento de los valores de LOI.

Finalmente, un aporte de Ayrilmis et al (2012) sobre el efecto de los compuestos de boro y fosfato sobre las propiedades físicas, mecánicas y al fuego de los compuestos de madera y polipropileno, en el que se evidenció una mayor estabilidad dimensional y resistencia en el impacto de flexión y tracción, así como la producción de mejoras modestas en el rendimiento

ante el fuego, indicado en la reducción de las tasas de liberación de calor, donde los mejores resultados se lograron con los tratamientos con fosfato.

Discusión

Teniendo en cuenta que el propósito central de la presente investigación es la de poder describir el comportamiento de maderas desarrolladas para resistir al fuego y los procedimientos conexos a su protección eficiente ante la flamabilidad, es necesario mencionar que en relación al Estado del arte se encontraron una serie de publicaciones que dan cuenta que existe una orientación investigativa en muchos lugares del mundo relacionada con la protección de la madera a diferentes tipos de riesgos., ya sea bióticos o abióticos, en dónde para el caso del comportamiento de la madera al fuego se ha podido delimitar una serie de sus líneas de investigación asociadas al comportamiento estructural y el desarrollo de elementos protectores.

Es preciso mencionar que en el contexto nacional las investigaciones frente al tema son realmente escasas, por lo que se sugiere que dentro de los programas de formación en ingeniería y aquellos de posgrado a nivel de las universidades colombianas, pueda crearse líneas de investigación conexas a comportamiento de la madera ante la flamabilidad.

Dentro de las líneas de investigación delimitadas es posible apreciar que el 52.7% tienden a establecer elementos de protección para la madera, más que describir su comportamiento o resistencia del fuego que en este caso se hallaron en el estado del arte publicaciones en el 34.9% y en lo que lo que tiene que ver con el comportamiento de madera desarrolladas para resistir al fuego representó el 12.4% de las investigaciones, lo cual evidencia que la existencia de material académico y científico alrededor de éste último aspecto es bajo incluso a nivel internacional.

En consonancia con el reporte de resultados sobre el comportamiento de la madera el fuego, diversas investigaciones y trabajos realizados dan cuenta que la madera a través de su

composición química hace posible que la energía se traduzca de manera inmediata y su propagación a través de las fibras de la madera se realiza muy fácilmente en atención a su alto contenido de carbono, por lo que la liberación de energía y la descomposición térmica se hacen dentro de un proceso muy corto en la línea de tiempo y su reacción a temperaturas bajas incluso desde los 66 grados centígrados en adelante, hacen que la madera tenga una alta sensibilidad ante la flamabilidad, tal y como lo han reportado diversos autores.

Adicionalmente, se pudo establecer que el tiempo en el que se mantiene la calefacción o exposición al fuego en la madera tiene unos efectos endógenos y exógenos en la matriz, donde el principal efecto se da en la celulosa y la hemicelulosa a través de las cuales el incremento de la temperatura puede generar una descomposición más acelerada, siempre y cuando comience a atacar la hemicelulosa, por lo que el hallazgo de alteraciones en polímeros de madera hace que su descomposición térmica sea menor que la sucedida en tableros de madera naturales, y la descomposición a temperaturas sobre los 200°C genera termo-oxidación exotérmica que ayuda a producir más calor que, junto a la presencia de radicales libres y gases producto de la flamabilidad se genera mayor calentamiento de la estructura. Se determinó también, que la presencia de grietas transversales o longitudinales no sólo es un enemigo estructural al reducir la capacidad de distribución de carga, sino que permite el ingreso de oxígeno a la estructura de madera lo cual contribuye a la aceleración de la combustión.

Ya desde el aspecto de la resistencia de la madera al fuego, algunos autores han reportado que la inclusión de elementos constructivos basados en madera natural o maderas desarrolladas permite una mejoría en la resistencia estructural fuego, en especial en aquellos que están compuestos de láminas que hacen posible el aumento del grosor de la estructura, lo cual disminuye el coeficiente de flamabilidad en relación a la fracción de incendio y el tiempo en el

que dura la exposición a la fuente calorífica. Por tanto, la degradación de sustratos internos ante la respuesta térmica se disminuye ostensiblemente hasta en un 14% y de esta manera se puede determinar que la resistencia de la madera se encuentra soportada por sus propiedades físicas de grosor o espesor que junto a elementos protectores, hacen que su eficiencia, aislamiento y flexibilidad ante la respuesta al fuego se vean como un aspecto de interés en el tema constructivo.

En relación al comportamiento de las maderas desarrolladas para resistir al fuego, aquellas cuya composición se hace a partir de residuos de madera con termoplásticos, vidrio y otro tipo de materiales, permite producir mejores productos con unas propiedades físicas y químicas que aumentan la resistencia al fuego, lo cual genera beneficios desde el punto de vista de la construcción. Además, el aprovechamiento de material reciclable ofrece de acuerdo al proceso de conformación de este tipo de madera, desarrollar una mejor resistencia al fuego en donde los ensayos de exposición han dado como resultado la posibilidad de entregar al entorno de la construcción un material con una mayor durabilidad gracias a que resiste a diferentes factores bióticos y abióticos, y donde la descomposición en la línea de tiempo puede ser hasta de 5 veces más que de las muestras naturales.

Por último, los métodos preventivos y correctivos para mejorar la respuesta de la madera ante el fuego, evidencian que la integridad estructural de la madera, junto al uso de protectores de origen químico, así como la introducción de otros materiales en el desarrollo de maderas, hacen que el comportamiento frente al fuego tenga una depreciación de la resistencia directa y mejora en las características ignífugas de la madera, disminuyendo el índice de carbonización junto a un incremento en el punto de ignición, lo que conlleva a una disminución del desplazamiento del fuego y penetración de la llama.

Conclusiones

De la presente revisión sistemática de la literatura que lleva al establecimiento de un estado del arte frente al comportamiento de la madera ante el fuego y los procedimientos conexos para su protección eficiente ante la flamabilidad, se puede concluir que existen unos antecedentes investigativos que dan cuenta de una investigación muy cerrada y especializada a la vez en la relación madera y fuego, en la cual la comunidad académica a nivel latinoamericano no tiene mayor representación en aportes a este conocimiento.

No obstante, desde el contexto internacional existen varias investigaciones que permiten establecer como el comportamiento de la madera frente al fuego parte de unas consideraciones en relación a su estructura orgánica a sus componentes microestructurales y aquellos que tienen que ver con el ambiente circulante y los usos constructivos que se den finalmente a la madera. En esta serie de pasos, la clasificación es orientativa para evaluar la capacidad del tipo de madera sus tratamientos previos aquellos que se suceden durante su uso y de los que terminan siendo parte de la manutención de la madera como estructura, tanto para enfrentar factores bióticos como abióticos.

Para el caso del comportamiento frente al fuego, los aspectos teóricos indican que patológicamente se pueden diferenciar algunas lesiones y causas así como consecuencias de un proceso resuelto o no resuelto, en el que su origen transcurrir y cierre patológico tienen un impacto importante en la vida de la estructura. De esta forma, el fuego como reacción ante elemento combustible en el que consume las estructuras de madera requiere una observancia por

la importancia que tiene en características sociales y económicas en las que se usa la madera como elemento estructural y arquitectónico.

Es claro decir, que el comportamiento de la madera al fuego tiene unos aspectos bien delimitados en relación a la capacidad de combustión poder calorífico estabilidad mecánica y aislamiento térmico de la madera, en donde cada una de estas variables establecen la ruta sobre la cual el fuego se hace presente se inicia y se propaga sobre el material.

Aquellos aspectos relacionados con la protección de la madera desde el punto de vista teórico dictan elementos constitutivos de protección que direcciona diferentes investigaciones en la que se utilizan diversos tipos de elementos y combinaciones de los mismos para poderlas proteger del inicio y propagación del fuego. No obstante, muy pocas investigaciones se han orientado al tema microcelular y nanotecnológico con el que se puedan realizar modificaciones estructurales de la madera que permitan una real resistencia de ella misma hacia el fuego. Algunos híbridos con materiales reciclajes han sido desarrollados con el ánimo de responder no sólo en el tema ambiental sino también desde el punto de vista económico y social a las nuevas tendencias de construcción con madera, donde se busca que al tiempo que puede ser utilizada en diferentes construcciones estructuras se pueda también proteger y conservar el medio ambiente.

En adición, los procedimientos de mayor eficiencia para la protección de la madera ante el fuego incluyen el tratamiento físico y químico, siendo de mayor eficiencia la creación de maderas desarrolladas que permiten durabilidad y eficiencia de la madera desde el punto de vista constructivo.

En cuanto a los manejos preventivos y correctivos del deterioro de la madera derivado de agentes abióticos como el fuego, se destaca que ya hay investigaciones en temas de modificación molecular desde temas nanotecnológicos y de transformación estructural de la madera como una

alternativa ecológica para mejorar la respuesta de la madera ante el fuego, sin demeritar por esto los ingentes esfuerzos realizados por otros investigadores en poder establecer los mejores procedimientos mecanismos y materiales para ser usados en la protección de la madera contra el fuego.

Recomendaciones

Teniendo en cuenta los resultados de la investigación realizada en cuanto al estado del arte del comportamiento de las maderas para resistir el fuego y los procedimientos para su protección eficiente ante la flamabilidad, se recomienda que en Colombia se adelanten actividades académicas e investigativas que permitan la construcción de un conocimiento propio acerca de este objeto de estudio en poblaciones de especies madereras que se tienen en nuestro país y que también son utilizadas a nivel estructural y arquitectónico.

En este sentido, se plantea la necesidad de que se tomen referentes investigativos como el que está contenido en el presente documento para direccionar la investigación en relación a las tendencias medioambientalmente más adecuadas para atender la intencionalidad investigativa de evaluaciones de la respuesta de la madera ante el fuego y su comportamiento en situaciones extremas.

De igual forma, sería de gran relevancia el poder desarrollar alianzas con grupos de investigación en el exterior que permite articular capacidades tecnológicas con aquellas de tipo académico en nuestro país, en las que se puedan dar procesos de indagación con nuevos materiales que puedan ser desarrollados en Colombia o de otros que vienen siendo utilizados en estructuras y fachadas con componentes de madera en nuestro medio urbano y rural, y que atendiendo a la baja incidencia de incendios urbanos y rurales en Colombia, no han generado un interés especial hacia este tema. Sin embargo, resulta de importancia poder aunar esfuerzos académicos para que este tipo de intencionalidades puedan convertirse en realidades investigativas en nuestro país.

Referencias

- Arata, Arrufat, Palacios, & Folie. (2001). *Variación de la resistencia con la temperatura*. París, Francia: Universidad de Favaro.
- Arriaga, F. (2002). *Intervención en estructuras de madera*. Aitim.
- Astorga, A., & Rivero, P. (2009). *Patologías en las edificaciones*. Caracas, Venezuela: Centro de Investigaciones en Gestión Integral de Riesgos.
- Ayúcar, J., Muro, J., Bollar, M., & Fouz, D. (2014). Rehabilitación de la estructura de madera del ayuntamiento de Berastegi (Gipuzkoa) mediante forjados colaborantes madera-hormigón. *Congreso Latinoamericano sobre patología de la construcción, 1843-1850*.
- Barreiro, S., & Hirsch, T. (2011). *Protección de la madera*. Uruguay: Fadu.
- Bonfante, P., & Bustos, K. (2014). *Caracterización, clasificación y patología de las especies de maderas más usadas en la construcción como elementos estructurales permanentes en la ciudad de Cartagena*. Cartagena D.T: Universidad de Cartagena.
- Bustos-Molina, K., Bonfante-Polo, A., & Rivera-Martínez, W. (2014). *Caracterización, clasificación y patología de las especies de maderas más usadas en la construcción como elementos estructurales permanentes en la ciudad de Cartagena*. Cartagena de Indias, Colombia: Universidad de Cartagena.
- Canosa, G., Maly, L., Keil, G., Tonello, M., & Giúdice, C. (2017). *Evaluación del comportamiento al fuego de la madera de pino ponderosa impregnada con 8 soluciones potencialmente ignífugas*. Buenos Aires, Argentina: Repositorio UTN.
- Domenech, L., Baño, V., Cetrangolo, G., & Morquio, A. (2016). *Rehabilitación de una cubierta de madera: proyecto y reparación*. Burgos, España: Memorias Congreso Euro-Americano REHABEND.
- Garay, R., & Henríquez, M. (2010). Comportamiento frente al fuego de tableros y madera de pino radiata con y sin pintura retardante de llama. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 12(1), 11-24.
- Gracia, M. (2018). *Donde hubo fuego: estudio de la gestión humana de la madera como recurso en el valle del Ebro entre el Tardiglacial y el Holoceno Medio*. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- Granjo, C. (2009). *Variación de la resistencia con la temperatura*. Barcelona: Esteves Ed.

- Gutiérrez, M., Bonilla, J., Cruz, M., Aranzalez, Q., & Guillermo, J. (2018). Linear expansion and fiber saturation point of *Guadua angustifolia* Kunth. . *Colombia Forestal*, 21(1), 69-80.
- Hernández, Fuente, D. I., & Campo. (2016). Universal Accessibility and Design for All as a Key Factor for Social Inclusion on the Basis of Curricular Design Thinking. *Riberdis*, 1135-1140.
- Hernández-Sampieri, R., Baptista-Lucio, P., & Fernández-Collado, C. (2010). *Metodología de la Investigación*. México DF: Editorial McGraw-Hill Interamericana.
- Herrera-Cardenete, E., Martínez-Ramos, & Iruela, R. (2016). *Patología de la construcción: Madera y fábrica de ladrillo, humedades*. Montevideo: Digibook.
- Herrero, M., Álvarez, R., Martitegui, F., González, G., & Maldonado, I. (2007). Estado actual de la investigación sobre madera estructural en España. *Informes de la Construcción*, 59(506), 15-27.
- Ipiña, A. (2017). *Modelado de los parámetros térmicos y cinéticos para la caracterización de la reacción al fuego de materiales*. Cantabria: Universidad de Cantabria.
- Jimenez-Florez, G. (2018). *Análisis de los sistemas electrónicos de alarma, detección y extinción automática de incendios en las nuevas edificaciones multiusos en Colombia*. Bogotá: Repositorio Universidad Militar.
- Keenan, F., & Tejada, M. (1987). *Maderas tropicales como material de construcción en los países del Grupo Andino de América del Sur*. Ottawa, ON, Canada: Space.
- Mendoza, C. (2016). El uso de la madera como material de construcción en la época republicana en el Perú. Estudio de caso: Club Social Pacasmayo. *Pueblo Continente*, 27(1), 147-154.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2012). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá: Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes.
- Mozo, A. (2018). *Madera y fuego*. Santiago de Compostela, Galicia-España.: Fundación Instituto Tecnológico de Galicia.
- Nutsch, W. (1996). *Tecnología de la madera y del mueble*. París, Francia: Reverté.
- Reinprecht, L. (2016). *Wood Deterioration, Protection, and Maintenance*. London, U.K: Wiley Blackwel Eds.
- Soria-López, F., & Guerrero-Baca, L. (2019). Polín de Bambú Ensamblado: diseño alternativo para la construcción de estructuras ligeras. *Legado de Arquitectura y Diseño*, 14(25), 84-95.

Sotomayor-Castellanos, J. (2018). Behavior of five Mexican woods exposed to fire. Evaluation by ultrasound. *Ciencia Unemi*, 11(27), 111-120.

Valdes, L., Martínez, L., Bonilla, M., & Castillo, I. (2016). Efectos del fuego en algunas características de suelos de pinares, Macurije, Pinar del Río, Cuba. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 12(2), 60-65.

Apéndice

Apéndice A. Relación de artículos seleccionados

No	Autor	Año	Título y Editor	PE	OE
1	Garay, R., & Henriquez, M	2010	Comportamiento frente al fuego de tableros y madera de pino radiata con y sin pintura retardante de llama. Maderas. Ciencia y tecnología, 12(1), 11-24.	x	x
2	Garay, M., & Henriquez, A.	2012	Tratamiento químico de acetilación en madera de Pinus radiata. Maderas. Ciencia y tecnología, 14(1), 103-113.	x	x
3	Ortiz Acevedo, D. T	2018	Análisis normativo y estudio estadístico de ensayos de resistencia al fuego de elementos divisorios horizontales y verticales en base a madera realizados en Chile.	x	x
4	Fonseca, M	2011	Criterios para la protección por diseño de la madera como material constructivo en exteriores. tc, 4, 1.	x	x
5	López, Y. M., Paes, J. B., & Rodríguez, E. M.	2018	Propiedades ignífugas de tableros de madera plástica producidos con diferentes especies forestales y termoplásticos reciclados. Madera y Bosques, 24(2).	x	x
6	Ortiz Acevedo, D. T.	2018	Análisis normativo y estudio estadístico de ensayos de resistencia al fuego de elementos divisorios horizontales y verticales en base a madera realizados en Chile.	x	x
7	Martínez López, Y., Benigno Paes, J., & Martínez Rodríguez, E.	2018	Propiedades ignífugas de tableros de madera plástica producidos con diferentes especies forestales y termoplásticos reciclados. Madera y bosques, 24(2).	x	x
8	Luque López, S.	2016	Análisis de la resistencia al fuego de una estructura: el Mercado de San Miguel.	x	x
9	Rojas, L., & Rocío,	2018	Comportamiento al fuego de edificaciones livianas con cubierta de membrana.	x	x
10	Majano Majano, M	2014	Madera termo-tratada de frondosas para uso estructural (Doctoral dissertation, Arquitectura).	x	x
11	Salazar Betanco, M., & Sequeira Calero,	2015	Propuesta de aplicación de un material piroretardante a materiales constructivos para la reducción de riesgos por incendios en el sector comercial de Nicaragua en el período de Septiembre 2014 a Septiembre 2015 (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua).	x	x
12	Tonello, L., Keil, G. D., Maly, L. E., Canosa, G., Giudice, C., & Martínez, A.	2017	Evaluación del comportamiento al fuego de la madera de pino ponderosa impregnada con 8 soluciones potencialmente ignífugas.	x	x
13	Keil, G., Tonello, M. L., Estadístico, C., Maly, L., de Trabajos Prácticos, J., Química, T., ... & Mecánica, T.	2015	Evaluación de la eficiencia ignífuga de soluciones hidrosolubles en la impregnación de madera de Pinus ponderosa Dougl. Ex Laws. Revista Forestal Yvyrareta, 22(59), 65.	x	x

14	Hernández Jara, J. E.	2010	Recopilación de Información sobre Comportamiento al Fuego de Elementos de Construcción de Viviendas.	x	x
15	Giraldo Forero, M.	2012	Evaluación del comportamiento del fuego y protección contra incendios en diversas tipologías de fachadas.	x	x
16	García Zumaquero	2016	Estudio de nuevos retardantes de llama para la ignifugación de madera maciza (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).	x	x
17	Keil, G., Maly, L., De Cristóforo, N., Refort, M., & Acciaresi, G.	2012	Comportamiento a la impregnación por vacío y presión de las maderas de Pinus ponderosa Dougl. Ex Laws y Araucaria angustifolia (Bertol.) Kuntze. Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata, 111(2), 99-110.	x	x
18	Arteaga Medina, E. A., & Picasso Garaycochea, J. M.	2018	Estudio y aplicación de resinas y aditivos inorgánicos como retardantes al fuego en maderas.	x	x
19	Alongi, J., & Malucelli, G.	2015	Thermal degradation of cellulose and cellulosic substrates. Reactions and Mechanisms in Thermal Analysis of Advanced Materials; Tiwari, A., Raj, B., Eds, 301-332.	x	x
20	Barber, D., & Gerard,	2015	Summary of the fire protection foundation report-fire safety challenges of tall wood buildings. Fire Science Reviews, 4(1), 5.	x	x
21	Fragiacomo, M., Menis, A., Clemente, I., Bochicchio, G., & Ceccotti, A.	2012	Fire resistance of cross-laminated timber panels loaded out of plane. Journal of Structural Engineering, 139(12), 04013018.	x	x
22	Frangi, A., & Fontana, M.	2010	Fire safety of multistorey timber buildings. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 163(4), 213-226.	x	x
23	Brischke, C., & Melcher, E.	2015	Performance of wax-impregnated timber out of ground contact: results from long-term field testing. Wood science and technology, 49(1), 189-204.	x	x
24	Daniliuc, A., Deppe, B., Deppe, O., Friebel, S., Kruse, D., & Philipp, C.	2012	New trends in wood coatings and fire retardant. European coatings journal, 7(08)	x	x
25	Wang, Z., Han, E., Liu, F., & Ke, W.	2010	Fire and corrosion resistances of intumescent nano-coating containing nano-SiO ₂ in salt spray condition. Journal of Materials Science & Technology, 26(1), 75-81.	x	x
26	Stark, N. M., White, R. H., Mueller, S. A., & Osswald, T. A.	2010	Evaluation of various fire retardants for use in wood flour-polyethylene composites. Polymer Degradation and Stability, 95(9), 1903-1910.	x	x
27	Arao, Y., Nakamura, S., Tomita, Y., Takakuwa, K., Umemura, T., & Tanaka, T.	2014	Improvement on fire retardancy of wood flour/polypropylene composites using various fire retardants. Polymer Degradation and Stability, 100, 79-85.	x	x

28	Son, D. W., Kang, M. R., Kim, J. I., & Park, S. B.	2012	Fire performance of the wood treated with inorganic fire retardants. <i>Journal of the Korean Wood Science and Technology</i> , 40(5), 335-342.	x	x
29	Guo, C., Zhou, L., & Lv, J.	2013	Effects of expandable graphite and modified ammonium polyphosphate on the flame-retardant and mechanical properties of wood flour-polypropylene composites. <i>Polymers and Polymer Composites</i> , 21(7), 449-456.	x	x
30	Tondi, G., Haurie, L., Wieland, S., Petutschnigg, A., Lacasta, A., & Monton, J.	2014	Comparison of disodium octaborate tetrahydrate-based and tannin-boron-based formulations as fire retardant for wood structures. <i>Fire and materials</i> , 38(3), 381-390.	x	x
31	Pabeliña, K. G., Lumban, C. O., & Ramos, H. J.	2012	Plasma impregnation of wood with fire retardants. <i>Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms</i> , 272, 365-369.	x	x
32	Terzi, E., Kartal, S. N., White, R. H., Shinoda, K., & Imamura, Y.	2011	Fire performance and decay resistance of solid wood and plywood treated with quaternary ammonia compounds and common fire retardants. <i>European Journal of Wood and Wood Products</i> , 69(1), 41-51.	x	x
33	Pedieu, R., Koubaa, A., Riedl, B., Wang, X. M., & Deng, J.	2012	Fire-retardant properties of wood particleboards treated with boric acid. <i>European Journal of Wood and Wood Products</i> , 70(1-3), 191-197.	x	x
34	Jiang, J., Li, J., Hu, J., & Fan, D.	2010	Effect of nitrogen phosphorus flame retardants on thermal degradation of wood. <i>Construction and Building Materials</i> , 24(12), 2633-2637.	x	x
35	Ren, Y., Wang, Y., Wang, L., & Liu, T.	2015	Evaluation of intumescent fire retardants and synergistic agents for use in wood flour/recycled polypropylene composites. <i>Construction and Building Materials</i> , 76, 273-278.	x	x
36	Ayrilmis, N., Akbulut, T., Dundar, T., White, R. H., Mengeloglu, F., Buyuksari, U., ... & Avci, E.	2012	Effect of boron and phosphate compounds on physical, mechanical, and fire properties of wood-polypropylene composites. <i>Construction and Building Materials</i> , 33, 63-69.	x	x
37	Haghighi Poshtiri, A., Taghiyari, H. R., & Naghi Karimi, A.	2013	The optimum level of nano-wollastonite consumption as fire-retardant in poplar wood (<i>Populus nigra</i>). <i>International Journal of Nano Dimension</i> , 4(2), 141-151.	x	x
38	Pan, M., Mei, C., & Song, Y.	2012	A novel fire retardant affects fire performance and mechanical properties of wood flour-high density polyethylene composites. <i>BioResources</i> , 7(2), 1760-1770.	x	x
39	Bai, G., Guo, C., & Li, L.	2014	Synergistic effect of intumescent flame retardant and expandable graphite on mechanical and flame-retardant properties of wood flour-polypropylene composites. <i>Construction and Building Materials</i> , 50, 148-153.	x	x
40	Jiang, T., Feng, X., Wang, Q., Xiao, Z., Wang, F., & Xie, Y.	2014	Fire performance of oak wood modified with N-methylol resin and methylolated guanylurea phosphate/boric acid-based fire retardant. <i>Construction and Building Materials</i> , 72, 1-6.	x	x

41	Liodakis, S., Tsapara, V., Agiovlasitis, I. P., & Vorisis, D.	2013	Thermal analysis of <i>Pinus sylvestris</i> L. wood samples treated with a new gel–mineral mixture of short-and long-term fire retardants. <i>Thermochimica Acta</i> , 568, 156-160.	x	x
42	Cheng, R. X., & Wang, Q. W.	2011	The influence of FRW-1 fire retardant treatment on the bonding of plywood. <i>Journal of Adhesion Science and Technology</i> , 25(14), 1715-1724.	x	x
43	Carosio, F., Cuttica, F., Medina, L., & Berglund, L. A.	2016	Clay nanopaper as multifunctional brick and mortar fire protection coating—Wood case study. <i>Materials & Design</i> , 93, 357-363.	x	x
44	Merk, V., Chanana, M., Keplinger, T., Gaan, S., & Burgert,	2015	Hybrid wood materials with improved fire retardance by bio-inspired mineralisation on the nano-and submicron level. <i>Green Chemistry</i> , 17(3), 1423-1428.	x	x
45	Seefeldt, H., & Braun, U. .	2012	A new flame retardant for wood materials tested in wood-plastic composites. <i>Macromolecular Materials and Engineering</i> , 297(8), 814-820.	x	x
46	Ladino Guerrero, J.	2019	Comportamiento estructural de la madera en flor morado, el acero laminado y el concreto de 3.000 PSI frente al fuego.	x	x
47	Canosa, G., Alfieri, P. V., & Giúdice, C.	2017	Comportamiento frente al fuego de madera tratada con “Whey Proteins”. <i>Jornada de Técnicas de Reparación y Conservación del Patrimonio</i> .	x	x
48	Sotomayor, J.	2018	Comportamiento de cinco maderas mexicanas expuestas al fuego. Evaluación por ultrasonido. <i>Revista Ciencia UNEMI</i> , 11(27), 111-120.	x	x
49	Martínez Martínez, J. E., Álvarez Rabanal, F. P., Coz Díaz, J. J. D., Lozano Martínez-Luengas, A. G., Alonso Martínez, M., & Regueira Gay, R.	2017	Análisis del comportamiento estructural de uniones de madera sometidas a la acción del fuego.	x	x
50	Keil, G. D., Refort, M. M., Cámara, R., Andía, I., & Martínez Meier, A.	2017	Comportamiento a la impregnación por vacío y presión de la madera juvenil de pino ponderosa.	x	x
51	Castellanos, J. R. S., & León, G. G.	2018	Reacción a la exposición al fuego de las maderas <i>Thuja plicata</i> Marshall y <i>Acer saccharum</i> L. <i>Ciencia Nicolaita</i> , (75).	x	x
52	Castellanos, J. R. S.	2018	Disminución del módulo dinámico de la madera por exposición al fuego. Evaluación por ondas de esfuerzo. <i>Memoria Investigaciones en Ingeniería</i> , (16), 21-36.	x	x
53	Etxebarria Castillo,	2016	Comportamiento frente al fuego de estructuras de madera.	x	x

54	Haurie Ibarra, L., Giraldo, P., Lacasta Palacio, A. M., Montón Lecumberri, J., & Sonnier, R.	2017	Influencia de diferentes parámetros en el comportamiento al fuego de siete especies de frondosas mejicanas. In LIGNOMAD17: Congreso sobre Construcción con Madera y otros Materiales Lignocelulósicos: Libro de resúmenes (pp. 146-150). Publicaciones EPSEB.	x	x
55	Gabalec, N.	2017	Comportamiento de madera PINUS ELLIOTTI por impregnación con anhídrido acético.	x	x