

NUEVOS PRESERVANTES DE MADERA

INFORME FINAL

PROPUESTA 042/2023

INSTITUCIÓN PROPONENTE: LATITUD - FUNDACIÓN LATU





Autores

LATITUD-FUNDACIÓN LATU

Silvia Böthig

Carlos Saizar

Joaquín Guillamón

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

Centro Universitario Regional Noreste, Sede Tacuarembó

Marcela Ibáñez

Facultad de Ingeniería, Instituto de Ingeniería Química

Rodrigo Coniglio

Ignacio Di Pascua

María Noel Cabrera

Leonardo Clavijo

Asesor

Jeffrey J. Morrell

Colaboradores

LATITUD-FUNDACIÓN LATU

Germaine Raszap

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

Centro Universitario Regional Noreste, Sede Rivera

Paola Serrentino



TABLA DE CONTENIDO

1.	ANTECEDENTES	6
2	OBJETIVOS	7
3	METODOLOGÍA	7
4	INTRODUCCION	8
4.1	Características de las maderas nacionales	9
4.1.1	Anatomía	9
4.1.2	Durabilidad natural.....	10
4.2	Deterioro de la madera	10
4.2.1	Agentes bióticos	11
4.2.2	Agentes abióticos	12
5	CLASES DE USO Y REQUERIMIENTOS DE PROTECCIÓN	14
6	PROTECCIÓN DE LA MADERA	16
6.1	Protección por diseño	17
6.2	Durabilidad adquirida.....	17
6.2.1	Preservación química.....	20
01	CREOSOTA	34
02	PENTACLOROFENOL.....	34
03	NAFTENATO DE COBRE	35
01	CCA	36
02	ACA y ACZA	36
01	ACQ	37
02	CA.....	37
03	Compuestos con Cu-HDO, CX.....	38
04	Cu-8.....	39
05	FORMULACIONES A BASE COBRE MICRONIZADO: MCA y MACQ	39
06	PRODUCTOS A BASE DE BORO	39
i	DOT, SBX, ZnB.....	39
ii	DPAB	40
07	TBTO.....	41
01	AAC-W	42
02	IPBC	42
03	Triazoles combinados con otros activos.....	43
i	IPBC/PPZ/TEB-SB-1	43

ii	PTI.....	43
04	ISOTIAZOLINONAS.....	43
i	DCOI.....	44
i	EL2.....	44
ii	MIT/CMIT.....	45
02	CIPROCONAZOL/TIAMETOXAM.....	45
03	PXTS.....	45
04	CLOROTALONIL.....	45
05	ETOFENPROX.....	46
6.2.2	Tratamientos térmicos.....	47
6.2.3	Modificación química.....	50
6.3	ESTADO DEL ARTE.....	¡Error! Marcador no definido.
6.3.1	Estado del arte de la preservación química.....	54
6.3.2	Perspectivas de la preservación química.....	75
6.3.3	Estado del arte modificación térmico.....	83
6.3.4	Estado del arte de la modificación química.....	88
7	ASPECTOS DE SOSTENIBILIDAD.....	91
7.1	Preservantes de madera históricos.....	92
7.1.1	Preservantes en formulaciones con base de aceite.....	92
7.1.2	Preservantes arsenicales cromados.....	95
7.1.3	Evaluación de beneficios y alternativas entre preservantes históricos.....	97
7.1.4	Estudios de Análisis de Ciclo de Vida (LCA).....	98
7.1.5	Preservantes de segunda generación basados en cobre.....	101
7.1.6	Preservantes de segunda generación basados en carbono.....	111
7.1.7	Preservantes basados en boro.....	132
7.1.8	Óxido de tributilestaño (TBTO).....	138
7.1.9	Preservantes de base biológica o naturales.....	139
7.2	Modificación química y térmica de la madera.....	140
8	MARCO LEGAL.....	144
8.1	Productos y Usos.....	144
8.1.1	Europa.....	144
8.1.2	Estados Unidos	145
8.1.3	Canadá	146
8.1.4	Australia	149
8.1.5	Chile	150
8.1.6	Brasil	153

8.1.7	Argentina	154
8.1.8	Uruguay	156
8.2	Registro de productos	156
8.2.1	Europa	156
8.2.2	Estados Unidos	160
8.2.3	Brasil	162
8.2.4	Argentina	163
8.2.5	Chile	164
8.2.6	Uruguay	164
8.3	Proceso Industrial	165
8.3.1	Disposiciones Ambientales	165
9	ANALISIS COMPARATIVO	182
9.1	Productos químicos	182
9.1.1	Valoraciones ambientales	182
9.1.2	Análisis de fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas	188
9.2	Tratamiento térmico	199
9.3	Modificación química	205
10	CONCLUSIONES	209
11	BIBLIOGRAFÍA	213
11.1	Referencias y comentarios del Capítulo 6. Aspectos de sostenibilidad	223
12	ANEXOS	230
	ANEXO 1. ESTUDIO TECNOECONÓMICO DEL PRESERVANTE MCA	230
1	Introducción	230
2	Estudio preliminar de mercado	230
2.1	Oferta y Demanda en Uruguay	230
2.2	Oferta en la región	231
2.3	Demanda en la región	231
2.4	Proyección de la demanda	232
2.5	Precio	233
3	Estudio Técnico de Prefactibilidad	233
3.1	Tamaño y Localización	233
3.2	Descripción del proceso productivo	234
4	Estudio Económico y Financiero	235
4.1	Inversiones	235
4.2	Ventas	236
4.3	Costos	237

4.3.1	Costos fijos	237
4.3.2	Costos variables.....	237
4.3.3	Costos de producción	238
4.4	Evaluación Económica y Financiera.....	238
5	Conclusiones.....	239
6	Bibliografía.....	240
ANEXO 2. ESTUDIO TECNOECONÓMICO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE LA MADERA..		241
1	INTRODUCCIÓN	241
2	Estudio preliminar de mercado	241
2.1	Demanda en Uruguay.....	241
2.2	Demanda en la región.....	242
2.3	Proyección de la demanda	242
2.4	Oferta en Uruguay.....	242
2.5	Oferta en la región	243
2.6	Oferta mundial.....	243
2.7	Precio.....	244
3	Estudio Técnico de Prefactibilidad.....	244
3.1	Tamaño y Localización	244
3.2	Descripción del proceso productivo.....	245
3.3	Etapas y Equipos	246
4	Estudio Económico y Financiero	247
4.1	Inversiones	247
5	Evaluación.....	248
5.1	Ventas	248
5.2	Costos.....	248
5.3	Evaluación Económica y Financiera.....	249
6	Conclusiones.....	250

1. ANTECEDENTES

El cambio climático y la transición hacia modelos de desarrollo sostenible son dos de los factores más importantes que configuran el desarrollo de la industria de la madera en la actualidad. En este sentido, se promueve la utilización de la madera y los productos de madera provenientes de plantaciones renovables como sustituto de otros materiales para la construcción. Sin embargo, su durabilidad y desempeño a largo plazo dependen en gran medida de la resistencia frente a la degradación. Por ello, el desarrollo de métodos de preservación eficientes, seguros y ambientalmente sostenibles es crucial para maximizar su vida útil.

La industria de la protección de la madera en Uruguay es un sector con poco desarrollo tecnológico y pocas innovaciones. Actualmente, el arseniato de cobre cromatado (CCA) sigue siendo el preservante más utilizado en el país, debido a su eficacia y su amplia trayectoria en el sector. No obstante, este producto ha sido objeto de crecientes restricciones regulatorias en diversas regiones del mundo debido a sus riesgos ambientales y toxicológicos. Esto ha impulsado la búsqueda de alternativas más seguras y sostenibles que permitan garantizar la durabilidad de la madera reduciendo el impacto en la salud humana ni el medio ambiente.

Esta consultoría tiene como objetivo proporcionar información detallada sobre el estado del arte en preservación de la madera y evaluar su aplicabilidad en el sector productivo uruguayo. Se busca generar insumos clave para la toma de decisiones tanto en el ámbito técnico como en el regulatorio, aportando datos relevantes a profesionales clave como arquitectos, especificadores, fabricantes, proveedores y otras partes interesadas en la industria de la construcción con madera, teniendo en cuenta las necesidades del mercado actual y los mandatos regulatorios y legales requeridos por los tomadores de decisiones relevantes.

Asimismo, se pretende ofrecer información estratégica para los responsables de políticas públicas, con el fin de facilitar la transición hacia normativas más alineadas con las tendencias globales en sostenibilidad y bioeconomía.

1 OBJETIVOS

El presente trabajo tiene como objetivos:

Presentar el estado del arte global en relación con los tratamientos, tecnologías, y productos existentes, así como nuevos tratamientos y procesos para la preservación de la madera de *Eucalyptus grandis* y de *Pinus* sp.

Analizar las limitaciones, desafíos y oportunidades de los tratamientos, tecnologías, y productos en la preservación de madera.

2 METODOLOGÍA

La metodología aplicada se basó en la recolección y el análisis de información a partir de diversas fuentes, incluyendo entrevistas con informantes calificados, búsquedas en línea, y solicitudes de documentos. Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura académica sobre el desempeño de los productos disponibles en el mercado, complementada con el análisis de normativas aplicables y disposiciones reglamentarias vigentes en distintas regiones del mundo.

Asimismo, se evaluaron artículos científicos y presentaciones en congresos internacionales, para identificar tendencias emergentes, investigaciones en curso y su potencial aplicabilidad en el contexto local. Se realizaron búsquedas de patentes relacionadas con tecnologías y metodologías de preservación de la madera, con el objetivo de identificar aquellas con mayor viabilidad para su implementación en la industria local nacional.

Además, se analizaron los principales actores a nivel global en la preservación de la madera y la experiencia de países con mayor desarrollo en la temática. Las consultas se orientaron a productos comerciales con alto potencial para distintas clases de uso considerando criterios técnicos, económicos y ambientales, así como su alineación con las regulaciones actuales y futuras. Se consultó a expertos y profesionales del sector y se relevaron empresas en relación con sus actividades. Toda la información obtenida fue analizada y categorizada, priorizando su calidad y relevancia.

La madera y los productos derivados de la madera pueden desempeñar un papel fundamental en el desarrollo sostenible, ya que pueden obtenerse a partir de recursos forestales sostenibles y disminuyen la huella de carbono de las construcciones y estructuras. La madera tiene numerosas ventajas en comparación con otros materiales de construcción, como una alta relación resistencia-peso, un buen aislamiento térmico, una fácil mecanización, una estética atractiva y actualmente también se buscan sus propiedades de confortabilidad. Sin embargo, la durabilidad de los productos de madera frente a diferentes agentes biológicos puede ser limitada y requiere una consideración especial relacionada las condiciones de protección. La importancia de la protección de la madera puede comprenderse al responder la pregunta: *¿Qué sucede si falla un elemento de madera de una construcción, un puente o un simple elemento de parquizado por pudrición o ataque de insectos?* Los fallos debidos al uso de maderas sin tratar cuando no presentan una durabilidad natural elevada o, mal tratadas pueden generar en primer lugar problemas de seguridad, por el colapso inesperado de estructuras de madera mal protegidas. Cualquier falla también trae costos de reposición y de trabajos de reparación y tiempo para reemplazar las vigas defectuosas y cualquier otro daño consiguiente causado. También existen consecuencias ambientales por utilizar más madera de la necesaria para el reemplazo, además de los costos asociados al transporte y la reinstalación. Por último, pero no menos importante, cada falla afectará negativamente la reputación general de la madera como material de construcción versátil y económico, el cual pierde credibilidad por parte de los consumidores.

Por todo esto, es necesario asegurarse que la madera mantenga un adecuado desempeño, extendiendo su vida útil según corresponda para cada uso, para un aprovechamiento económico y ambientalmente eficiente del recurso, así como para mejorar y mantener las excelentes credenciales de rendimiento de la madera.

Las principales especies cultivadas en Uruguay con destino de transformación mecánica son *Eucalyptus grandis* Hill, ex Maiden, *Pinus taeda* Linneaus y *Pinus elliottii* Engelm.

3.1.1 ANATOMÍA

E. grandis

La madera de esa especie está formada por células longitudinales (vasos leñosos o poros), fibras, (parénquima axial) y transversales (radios leñosos). Los vasos, característicos de las latifoliadas son estructuras tubulares cuya principal función es la conducción de savia en arboles vivos. Difieren de las fibras por no estar completamente cerrados y presentar grandes perforaciones en los dos extremos (Langrish & Walker, 1993). Presentan una porosidad difusa con vasos escasos y en disposición diagonal, que se refleja en la ausencia de anillos de crecimiento demarcados. Los vasos se comunican entre sí a través de puntuaciones, que son depresiones en las paredes de las células que permiten el pasaje de fluidos entre ellas. Los vasos son los responsables de la alta permeabilidad longitudinal de la albura en las latifoliadas, mientras que el parénquima axial y radial, que normalmente no son fáciles de penetrar, en algunos casos pueden ser importantes vías de entrada de los líquidos de impregnación (Siau, 1984).

La albura de *E. grandis* es la madera de color más claro que ocupa los primeros 2 a 3 cm junto a la corteza. Transporta agua y minerales desde la raíz a las ramas y hojas. Está formada por tejido vivo y tejido muerto que sirve de sostén a la estructura del árbol y acumula sustancias de reserva, lo cual la hace menos resistente al biodeterioro. Con el correr de los años se produce acumulación extractivos en las células de la albura, disminuyendo la permeabilidad de la madera y convirtiéndose en duramen. Está ubicado hacia el centro del árbol y se distingue por su de coloración más oscura, de tintes rosados.

Según un estudio de (Rava, en revisión), el duramen de *E. grandis* proveniente de plantaciones de 16 años del departamento de Rivera en Uruguay, calificó de "Poco Impregnable a No Impregnable" mientras que la albura de los mismos árboles se comportó como "Impregnable" de acuerdo a la norma PD CEN/TR 14734:2004.

P. taeda y *P. elliottii*

En el caso de los *Pinus* sp. las células longitudinales consisten mayormente en traqueidas además del parénquima axial. Las traqueidas cumplen las funciones de soporte de la planta y de transporte de savia.

En su sección transversal se pueden diferenciar los anillos de crecimiento, distinguiéndose dentro de los mismos el leño temprano, y el leño tardío. En líneas

generales, las traqueidas formadas en primavera presentan mayores diámetros de lúmenes, confiriéndoles una alta eficiencia en la conducción de agua y alta resistencia a la cavitación ((Sperry et al. (2006) en (Bulfe & Fernández, 2017)). Por otro lado, el leño tardío presenta traqueidas de diámetros más estrechos con menor capacidad de conducción de agua (Sperry & Tyree (1990) y Sperry et al. (2006) en (Bulfe & Fernández, 2017)).

En Uruguay estas especies presentan rápido crecimiento con un tardío proceso de duraminización. Como consecuencia, los árboles cosechados consisten mayormente en albura, tejido que es completamente impregnable.

3.1.2 DURABILIDAD NATURAL

La durabilidad frente al biodeterioro de la madera o sus derivados es la resistencia del material a la destrucción por parte de los organismos que degradan la madera. Esta característica se relaciona con las propiedades físicas, químicas y anatómicas de la madera, y está influenciada por diversos factores como la especie, la edad (madera juvenil o adulta), la genética y el origen de la plantación.

La madera de *P. taeda* o *P. elliottii* disponible en el mercado nacional proviene de la albura. Esta madera es no durable frente a hongos e insectos según la norma EN 350:2016 (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2016) y estudios nacionales que corroboraron esta información.

Por otro lado, la madera de *Eucalyptus grandis* se clasifica como no durable frente a termitas, y como medianamente a poco durable (categorías 3-4) frente a hongos descomponedores según ensayos de laboratorio y de campo en madera proveniente de plantaciones de 16 años en Uruguay (Böthig et al., 2016, (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2016)). Por otra parte esta especie fue reportada como durable frente a *Anobium* sp. (Lorenzo, et al., 2009).

3.2 DETERIORO DE LA MADERA

La madera sufre un proceso de degradación biológica conocido como biodeterioro; su aspecto y resistencia pueden ser afectados por agentes biológicos como mohos, hongos cromógenos, hongos xilófagos, insectos (coleópteros xilófagos o termitas), y organismos marinos como crustáceos y moluscos. Asimismo, puede sufrir degradación por agentes abióticos como el agua, la radiación UV, el calor, el viento y el fuego, así como por combinaciones de estos factores.

La intensidad del biodeterioro depende de la especie de madera, las condiciones ambientales, incluyendo la humedad y la temperatura, los agentes involucrados y la protección que se le otorgue a la madera.

3.2.1 AGENTES BIÓTICOS

Los hongos que pudren la madera son los organismos destructivos más comunes en los climas templados y fríos, mientras que las termitas son un vector dominante en las regiones más cálidas

3.2.1.1 HONGOS DE PUDRICIÓN

Los hongos xilófagos, conocidos como hongos de pudrición, se alimentan de los componentes estructurales de la madera (celulosa, hemicelulosa y/o lignina), pudiendo producir un daño importante en sus propiedades físicas y mecánicas.

De acuerdo con el patrón de degradación que producen estos hongos, la pudrición se puede clasificar en pudrición blanca o fibrosa, parda o cúbica (producidas ambas por hongos basidiomicetos) y pudrición blanda (causada por hongos ascomicetos, aunque también por bacterias).

3.2.1.2 INSECTOS XILÓFAGOS

Los insectos que producen daños más significativos en la madera industrializada son los coleópteros, llamados comúnmente escarabajos o carcomas, y las termitas, que pertenecen al orden Isóptera.

Los coleópteros oviponen en la madera; los huevos eclosionan dando lugar a larvas y al que se alimentan de la madera, perforándola y generando galerías. El adulto emerge y puede reinfestar la madera, generándose un ciclo, cuya duración depende de la especie y de las condiciones climáticas.

Hylotrupes bajulus es conocido como "bicho taladro". En Uruguay ataca la madera de pino contenidos de humedad entre 15 % y 50 %. Si bien la madera seca en horno no debería estar contaminada, puede ser reinfestada.

El género *Anobium* abarca los insectos llamados carcoma común, que atacan madera de coníferas (pino) y de latifoliadas (eucalipto, álamo) con valores de contenido de humedad en un rango de 10 % a 50 %.

Los insectos conocidos como polillas de la madera o escarabajos de polvo de madera son especies del género *Lyctus*. Prefieren madera de albura de latifoliadas seca, tolerando un contenido de humedad entre 6 % y 30 %.

Las termitas son insectos eusociales que se diferencian en grupos que abarcan diferentes géneros con distintos hábitos de anidación y propagación: termitas subterráneas, de madera seca, y de madera húmeda. Son los insectos más perjudiciales para la madera estructural y no estructural, principalmente por ser organismos sociales que viven en colonias organizadas, que pueden llegar a agrupar millones de individuos. Según sus hábitos se clasifican en los siguiente grupos:

Termitas de madera húmeda (Hodotermitidae).: Son capaces de afectar madera con muy altos contenidos de humedad

Termitas de madera seca (Kalotermitidae): Necesitan un contenido de humedad de aproximadamente 14%. Se encuentran principalmente en regiones cálidas y húmedas.

Termitas subterráneas (Rhinotermitidae): Son las más ampliamente distribuidas y las más dañinas. Afectan madera de coníferas y de latifoliadas, sana o en descomposición, y si bien necesitan humedad del 20% para degradar la madera, ellas pueden manipular las condiciones del entorno, acarreando humedad de fuentes cercanas.

Hasta el momento, en Uruguay ha sido oficialmente reportada una sola especie que ataca la madera en servicio, *Reticulitermes flavipes* (termita subterránea). Si bien ha sido ubicada en zonas costeras, no hay evidencia de que estén ausentes en el resto del país, ni de que no haya otras especies relevantes.

3.2.1.3 HONGOS DE MANCHA Y MOHOS

Estos hongos se alimentan de las sustancias de reserva de la madera sin afectar su estructura. Sin embargo producen deterioro estético y también pueden generar afectaciones en la salud debido a las esporas ¹ liberadas. Las afectaciones pueden ir desde producir alergias hasta patologías pulmonares en casos extremos.

3.2.2 AGENTES ABIÓTICOS

3.2.2.1 HUMEDAD

Un requisito previo clave para la degradación de la madera por agentes biológicos es la presencia de humedad. La madera es porosa e higroscópica;

¹ Las esporas son estructuras microscópicas unicelulares o pluricelular que se producen los hongos con fines de dispersión y supervivencia

pudiendo absorber agua en forma líquida y gaseosa. El transporte de humedad en la madera depende de varios factores, como las propiedades anatómicas y el gradiente de contenido de humedad. Variaciones de humedad en la madera pueden causar agrietamientos que a su vez se constituyen en nuevas vías de entrada de humedad y microorganismos a la madera. El agua es también vehículo para el transporte de esporas de hongos y bacterias que así colonizan la madera. Por otra parte, el agua corriente puede producir también lavado de extractivos de la madera y también de productos preservantes lixiviables.

Las fuentes de agua pueden ser la humedad atmosférica, humedad del suelo, la lluvia, o también filtraciones o condensaciones en la madera en uso.

3.2.2.2 RADIACIÓN SOLAR

La radiación ultravioleta actúa sobre la madera generando radicales libres y reacciones complejas de oxidación de la lignina, que producen decoloración y desfibrado de la misma. Esto tiene un efecto estético pero también la hace más permeable al agua, favorece la generación de grietas y aumenta la susceptibilidad a la biodegradación.

La radiación infrarroja produce calentamiento en la madera. Los cambios térmicos en la superficie favorecen la evaporación del agua generando contracciones localizadas y fisuras que también contribuyen con el biodeterioro.

3.2.2.3 VIENTO

El viento actúa como agente de erosión arrastrando partículas minerales que golpean la superficie. Asimismo, acelera la evaporación del agua, favoreciendo el agrietado y también transporta esporas de hongos hacia la madera.

3.2.2.4 FUEGO

La madera es un material combustible, que en presencia de un comburente como es el oxígeno del aire puede originar fuego una vez que recibe suficiente energía de activación (chispa). Esto es conocido como el triángulo del fuego.

La madera expuesta a un foco de calor disminuye su contenido de humedad en la zona directamente afectada al alcanzarse el punto de ebullición. Si se mantiene el aporte de calor hasta llegar a una temperatura de 270 °C comienza el desprendimiento de gases, que en caso de continuar ascendiendo la temperatura son susceptibles de arder; este proceso se llama pirólisis de la madera. Si la madera no se expone a llama directa no arderá hasta alcanzar los 400 °C, o alrededor de los 300 °C en el caso de estar expuesta a llama directa.

(La carbonización superficial de la madera la protege y enlentece la reacción de combustión²).

4 CLASES DE USO Y REQUERIMIENTOS DE PROTECCIÓN

De acuerdo a las condiciones de uso, un producto de madera va a estar expuesto a diferentes condiciones ambientales (temperatura, humedad y aireación) que determinan mayor o menor probabilidad de humedecerse y así sufrir biodeterioro pudiendo comprometer su integridad. Sobre esta base se definen las “clases de uso”, categorías de exposición con el objetivo de clasificar según el riesgo para acotar las medidas de prevención requeridas. Si bien existe una norma internacional ISO 21887:2007 (E) (International Standards Organization (ISO), 2007)) que define cinco clases de uso, estas categorías pueden diferir levemente entre diferentes cuerpos normativos y los países adoptantes (AWPA: Estados Unidos (www.awpa.org.uy); CSA: Canadá (<https://www.csagroup.org/store/product/2423911/>); CEN: Unión Europea (<https://www.cencenelec.eu/european-standardization/european-standards/>); AS: Australia (<https://www.standards.org.au/>); ABTN: Brasil (<http://www.abnt.org.br>); INN: Chile (<https://www.inn.cl>)).

A continuación, se presenta la definición e interpretación de las clases de uso utilizadas en la Unión Europea y definidas en la norma EN 335 (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2014)).

Clase de uso 1: Uso interior y seco; contenido de humedad generalmente de 8 % a 12 % (en base seca), y nunca alcanza el 20%. No está expuesto a la humidificación.

Mientras que el ataque por hongos es despreciable, puede existir ataque por insectos xilófagos incluyendo las termitas, aunque la magnitud del riesgo depende de la ubicación geográfica.

Ejemplos: estructura de la cubierta de una vivienda, tablas de piso interior, dinteles, carpintería interior; maderas en plantas superiores no integradas en paredes exteriores macizas.

Clase de uso 2: Uso interior o bajo cubierta no expuesta a la intemperie, con posibilidad de humidificación ocasional o accidental y condiciones para el rápido secado. Esta situación involucra en general una humedad de equilibrio media de entre el 12 % y el 20 %. No obstante, en caso de atmósferas con alta humedad o puede ser necesario asignar una clase de uso superior

² <https://aneproma.es/wp-content/uploads/2017/06/la-combustion-de-madera.pdf>

Se puede producir ataque por hongos cromógenos y por hongos xilófagos. Es posible el ataque por insectos xilófagos incluyendo las termitas, aunque la magnitud del riesgo depende de la ubicación geográfica.

Ejemplo: Listones de tejado; entramados de madera en casas; madera en cubiertas inclinadas con riesgo de condensación; maderas en techos planos; soleras sobre sello impermeabilizante; viguetas de madera en plantas superiores integradas en muros exteriores, madera expuesta en baño o cocina, madera de interior en zonas frías o fugas de agua inadvertidas.

Clase de uso 3.1: Uso exterior protegido, sin contacto con el suelo, expuesto a condiciones de humedad a la intemperie durante cortos períodos de tiempo. La humedad de la madera es frecuentemente mayor a 20% pero el agua no se acumula sobre la madera.

Se puede producir ataque por hongos cromógenos y por hongos xilófagos. Es posible el ataque por insectos xilófagos incluyendo las termitas, aunque la magnitud del riesgo depende de la ubicación geográfica.

Ejemplos: Carpintería exterior y revestimiento (con aplicación de protección superficial o revestimiento), viguetas de cubierta de una piscina, vigas de un alero exterior con cubierta protectora o donde los elementos de madera están protegidos por diseño (tablas protectoras fácilmente reemplazables, recubrimiento con otros materiales, etc.).

Clase de uso 3.2: Exterior, sin contacto con el suelo, y expuesto a condiciones de humedad a la intemperie durante períodos largos. La humedad de la madera es frecuentemente mayor a 20% y el agua puede acumularse.

Se puede producir ataque por hongos cromógenos y por hongos xilófagos. Es posible el ataque por insectos xilófagos incluyendo las termitas, aunque la magnitud del riesgo depende de la ubicación geográfica.

Ejemplos: Vigas de un alero al exterior y sin cubierta protectora y sin ninguna medida de protección por diseño, revestimiento exterior de un muro.

Clase de uso 4: Exterior, en contacto con el suelo o con agua dulce.

Se puede producir ataque por hongos cromógenos y por hongos xilófagos. Es posible el ataque por insectos xilófagos incluyendo las termitas, aunque la magnitud del riesgo depende de la ubicación geográfica. Puede haber ataque por bacterias cuando la madera está sumergida o saturada de agua por largos períodos.

Ejemplo: Fundaciones, pilares o postes enterrados en el suelo o pilares de embarcadero en un río o lago

Clase de uso 5: Permanente o regularmente sumergido en agua salada.

El principal problema es el ataque por invertebrados marinos aunque en la parte aérea de los elementos de madera sumergidos también puede existir ataques de hongos xilófagos o mohos superficiales y hongos cromógenos.

Ejemplo: pilares de un embarcadero en agua de mar

De acuerdo a la norma ISO 21887:2007 (International Standards Organization (ISO), 2007) se acepta internacionalmente que la asignación de un producto o componente de construcción a una clase de uso particular se complementa con un buen diseño, uso y mantenimiento de la construcción. Se puede asignar una mayor clase de uso si se prevé potenciales condiciones que resulten en un riesgo mayor que los normales para los usos típicos. De forma similar, se puede asignar una clase de uso más alta si hay un aspecto crítico o de seguridad en el uso final considerando su vida útil. Un especificador o usuario debe considerar estos factores, pudiendo optar por un nivel de seguridad algo mayor adoptando requisitos de preservación relacionados con una situación de clase de uso superior.

Por otra parte, es necesario equilibrar los costos adicionales del tratamiento preservante o el uso de maderas de suficiente durabilidad natural con los costos futuros de remediación o reparación de componentes defectuosos. Por ejemplo, algunos elementos de madera pueden tener una vida útil más corta si su reemplazo puede ser sencillo y económico. En estas situaciones los costos de preservación o de mayor durabilidad de la madera podrían no estar justificados. Por el contrario, cuando la remediación o reparación es costosa, o cuando el deterioro puede conducir a un debilitamiento o colapso estructural grave, comprometiendo la seguridad, es necesario especificar un nivel más severo. De igual forma debe tenerse en consideración las condiciones de uso, una estructura que no va a recibir el mantenimiento que debería, tiene que tener medidas de prevención más estrictas.

5 PROTECCIÓN DE LA MADERA

Diferentes estrategias deben combinarse para la protección de la madera. La combinación del diseño constructivo, la selección de materiales de acuerdo al uso y el mantenimiento juega un rol crucial en el funcionamiento y la vida útil de una estructura. Sin embargo, en aplicaciones como durmientes de ferrocarril, postes de servicios públicos, pilotes marinos y estructuras asociadas, en muros de contención del suelo la protección de la madera a través del diseño es menos importante frente a la protección química.

Por otra parte, un sistema de protección de la madera efectivo para asegurar una adecuada en servicio deberá considerar además de la proyección por

diseño y/o preservantes frente a los riesgos biológicos, la aplicación de repelentes de agua y recubrimientos.

5.1 PROTECCIÓN POR DISEÑO

Dado el rol fundamental del agua en el biodeterioro, mantener la madera seca es la base para protegerla de la degradación. El contenido de humedad de la madera no debería superar el 19%. Esta sola condición, sin embargo, no es suficiente ya que algunos organismos y microorganismos pueden adaptarse a bajos contenidos de humedad y por otra parte la madera es higroscópica, es decir absorbe humedad del ambiente.

La protección por diseño es la aplicación en el diseño constructivo de estrategias orientadas a proteger la madera de los diferentes agentes de deterioro. En el caso del biodeterioro la clave es protegerla de todas las fuentes posibles de humedad (filtraciones, condensaciones, fugas de cañerías) y a facilitar la evaporación cuando la humectación se produce. Asimismo, existen estrategias de diseño y prácticas sistemáticas para prevenir el ingreso de termitas en la estructura.

5.2 DURABILIDAD ADQUIRIDA

Cuando la durabilidad natural de la madera no es adecuada para una cierta prestación (Clase de uso) puede mejorarse su desempeño a través de tratamientos fisicoquímicos (durabilidad adquirida).

Si bien la mencionada norma internacional ISO 21887:2007 (E) (International Standards Organization (ISO), 2007) provee una guía para la especificación de preservantes, proceso de aplicación, selección de madera naturalmente durable o modificada, no provee especificaciones definitivas. Los requisitos desarrollados en las diferentes regiones tienen características en común, pero a menudo han evolucionado diferencias distintas en respuesta a necesidades geográficas, climáticas o de uso final locales particulares. Las prácticas bien establecidas en diferentes regiones a menudo están incorporadas en códigos y especificaciones estándar que a su vez forman parte o están integradas en regulaciones nacionales o regionales. Se recomienda consultar las especificaciones locales del destino del producto. En la Tabla 1 se presentan referencias locales de diferentes países y direcciones web que facilitan el acceso a los requisitos de la madera (tratada, modificada, natural resistente, etc.) para un uso prolongado.

Tabla 1. Contactos locales en referencia a protección de la madera en diferentes países y algunas referencias normativas relevantes

País	Referencias locales	Dirección web
Alemania	Deutschen Fachausschuss Holzschutz (Comité Alemán de Expertos para la Protección de la Madera)	http://www.holzschutztagung.de/
Australia	Timber Preservers' Association Australia	http://www.tpaa.com.au/timber-treatment/
	Australian Government, Department of Agriculture, Fisheries and Forestry	https://www.agriculture.gov.au/biosecurity-trade/import/goods/timber/approved-treatments-timber/permanent-preservative-treatment#preservative-retention-requirements
	La Autoridad Australiana de Pesticidas y Medicamentos Veterinarios aprueba y regula los preservantes de la madera que pueden usarse en Australia, y las normas australianas y neozelandesas especifican la concentración de un conservante particular y la profundidad que debe penetrar en la madera para protegerla del peligro biológico esperado, a la que estará expuesto.	https://www.epa.nsw.gov.au/your-environment/household-building-and-renovation/treated-timber/treated-timber-regulation-standards
Brasil	ABPM: Associação Brasileira de Preservadores de Madeira	https://www.abpm.com.br/normas-e-legislacao/#1530723449234-eebc5f8e-65e8
Canadá	CWPA, Wood Preservation Canada	http://woodpreservation.ca/index.php/en/specifiers-guide
	Los pesticidas utilizados en las instalaciones de preservación de la madera están regulados por la Agencia Reguladora del Manejo de Plagas de Health Canada.	https://www.canada.ca/en/health-canada/services/consumer-product-safety/pesticides-pest-management.html
Chile	Centro UC-Corma de Innovación en Madera	https://madera.uc.cl/ https://www.madera21.cl/
	Centro Nacional para la Industria de la madera, CENAMAD	https://cenamad.cl/
	Reglamento de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) y Decreto Supremo N° 10 de Vivienda y Urbanismo (DS10)	https://www.madera21.cl/blog/2020/03/31/normas-tecnicas-para-cumplir-con-los-requisitos-para-construir-en-madera/ https://www.kreando.cl/oguc titulo 5 capítulo 6.htm https://ecommerce.inn.cl/nch819201245793
China	China Wood Conservation Development Center Wood Protection Research Group (WPRG@CAF) Research Institute of	Dr Mingliang Chiang - mingliang65@163.com

País	Referencias locales	Dirección web
	Wood Industry. Chinese Academy of Forestry Beijing, China	
	Normas de referencia: GB/T 27654-2023. Wood preservatives GB/T 29563-2013 - English Version of China National Standard Management specification of wood protection GB/T 35817-2018. General technical requirements of modified wood with resin impregnation for interior application	https://www.gbstandards.org/index/standards_search.asp?word=Wood
España	ANEPROMA. Asociación Nacional de Empresas de Protección de la Madera	https://aneproma.es/
	AITIM Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera	https://infomadera.net/modulos/aitim.php?id=4
	Se aplican normas europeas EN	
Estados Unidos	American Wood Protection Association. AWP.	http://awpa.com/references/
	Preserved Wood	preservedwood.org
	Se aplican normas AWP	
Francia	CTBB+	https://www.protection-traitement-bois.fr/
	Aplican normas europeas y nacionales adicionales Ley de termitas (decreto nº 2006-591) NF B50 105-3: requisitos de penetración/retención. FD P20-651: diseño de obras según clases de empleo y soluciones adaptadas según clases de longevidad	https://ctbbplus.fr/normes-et-reglementations/
Japón	Japan Wood Protection Association Aplican normas JAS y JIS	http://www.mokuzaihozon.org/index.html
Nueva Zelanda	New Zealand Timber Preservation Council Normas AS y NZ	http://www.nztpc.co.nz/hazardClassDescription.php
Países Nórdicos	Nordic Wood Preservation Council Aplican normas europeas y nacionales	https://www.nwpc.eu/ , https://www.nwpc.eu/index.php/finding-the-right-timber/
	Wood Protection Association	https://www.thewpa.org.uk/

País	Referencias locales	Dirección web
Reino Unido	The Timber Research and Development Association	https://apkpure.com/trada-wood-species-guide/uk.co.trada.woodspeciesguide
	Aplican normas europeas EN y nacionales BS. Código de buenas prácticas BS 8417 Preservation of Wood Code of Practice	https://knowledge.bsigroup.com/products/preservation-of-wood-code-of-practice?version=standard&tab=preview
	Code of Practice: Industrial Wood Preservation	https://woodcampus.co.uk/wp-content/uploads/2023/10/WPA-Code-of-Practice-Industrial-Wood-Preservation-v.3-2023.pdf
Unión Europea	European Institute for Wood Preservation Normas de referencia: EN 15228:2009 (madera estructural), EN 335, EN 599, EN 490, EN 350	https://wei-ieo.org/
Sudáfrica	SAWPA. South African Wood Preservers Association	https://sawpa.co.za/choosing-the-right-preservative-treated-timber

A nivel global existe la “*International Research Group on Wood Protection, IRG WP*” (www.ircg-wp.com), un foro para la discusión y divulgación de resultados científicos, integrado por especialistas en la temática de todo el mundo. Esta organización incluye la academia y el sector industrial. Otro ámbito internacional de intercambio que se ocupa de los procesos de deterioro y protección de madera es la *Division 5: Forest products* de la *International Union of Forest Research Organizations, IUFRO*, (<https://www.iufro.org/science/divisions/division-5/>)

5.2.1 PRESERVACIÓN QUÍMICA

La preservación química consiste en introducir en la madera un producto químico protector en la cantidad necesaria según ciertas especificaciones.

La cantidad necesaria es cuantificada a través de dos parámetros:

- Retención: Es la cantidad de preservante absorbido por unidad de volumen del producto impregnado y es expresada en kg / m³.
- Penetración: Es la mínima profundidad que alcanza el preservante dentro del material impregnado y es expresada en mm o en porcentaje de albura para el caso de la madera rolliza.

La clase de uso proyectada para la madera determina los requisitos de profundidad y retención del preservante. En la Tabla 2 se esquematiza una interpretación de dichos requisitos establecidos en la normativa europea EN599

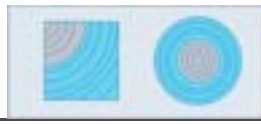
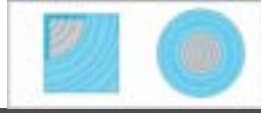
(Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2014), mientras que la Tabla 3 explica la clasificación de los tipos de profundidad requeridos.

Tabla 2. Interpretación de EN 599-1 sobre requisitos de penetración (NP) y categorías de retención (R) de los protectores para las clases de uso, extraído de (Peraza Sánchez, 2001). Los NP se explican en la Tabla 3.

Clase de uso	Exposición a la intemperie	Requisitos según las aplicaciones				Contenido de humedad de la madera
		Carpintería		Estructuras		
		Profundidad	Retención	Profundidad	Retención	
1	Interior bajo cubierta	NP1	R1	NP2	R2	inferior 20%
2	Interior bajo cubierta	NP1	R2	NP2	R2	en alguna ocasión > 20%
3,1	Exterior, por encima del suelo, protegido	NP2	R3.1	NP3	R3.2	en alguna ocasión > 20%
3,2	Exterior, por encima del suelo, no protegido	NP3	R3.2	NP3	R3.2	frecuente > 20%
4,1	Exterior, en contacto con el suelo o agua dulce	NP5	R4.1	NP5	R4.1	permanente > 20%
4,2	Exterior, en contacto con el suelo (intenso) y/o agua dulce	NP6	R4.2	NP6	R4.2	Permanente > 20%
5	Contacto agua salada	NP6	R5	NP6	R5	permanente > 20%

Tabla 3. Descripción de requisitos de penetración de EN 599-1, extraído de (Wood Protection Association, 2023)

	Requisito de penetración (mm)	Zona analítica (mm)	Penetración típica (Nota 4)
NP1	Sin ningún requisito	3 mm desde las caras laterales	
NP2	Un mínimo de 3 mm en las caras laterales en la madera de albura	3 mm desde las caras laterales en la albura	 Nota 1

NP3	Un mínimo de 6 mm en las caras laterales en la madera de albura	6 mm desde las caras laterales en la albura	
NP4 (Nota 2)	Un mínimo de 25 mm en las caras laterales en la madera de albura	25 mm desde las caras laterales en la albura	
NP5	Toda la albura.	Toda la albura	
NP6 (Nota 3)	Toda la albura y mínimo 6 mm en la madera de duramen expuesta	Toda la albura y mínimo 6 mm en la madera de duramen expuesta	

NOTAS:

1. Si no es posible distinguir entre duramen y albura, toda la muestra debe considerarse como albura.
2. NP4 solo se aplica a la madera rolliza de especies resistentes.
3. Cuando se especifica la clase de penetración NP6 para algunas maderas en Clase de uso 4, se requiere penetración total en la albura. La penetración del duramen debe ser visible a 6 mm y en el 75 % de la sección transversal de la zona analizada a lo largo de cualquier cara en la que esté presente el duramen. Debe haber una profundidad mínima de penetración de 6 mm en la madera además, independientemente de si la madera incluye albura o duramen, incluyendo áreas donde el maquinado ha resultado en una banda muy estrecha de albura (menos de 6 mm) en la superficie.
4. Los diagramas en la última columna, que muestran la penetración del preservante, son solo para fines ilustrativos; la penetración real variará según la especie y las proporciones de duramen/albura dentro de cada componente tratado.

Las retenciones adecuadas para cada clase de uso deben ser determinadas a través de una batería de ensayos de eficacia protectora frente a los agentes relevantes para la clase de uso proyectada. Para que estos estudios sean válidos deben ser realizados de acuerdo a las normas técnicas indicadas en el sistema normativo que se esté aplicando, Con este objetivo se ejecutan pruebas de campo, donde se simulan condiciones similares a las proyectadas para la vida en servicio y pruebas de laboratorio donde se estudia el desempeño del preservante frente a todos los agentes de deterioro por separado.

La mínima retención requerida va a depender de los agentes presentes en el lugar, de las condiciones ambientales a las que se expone y de la especie de madera a preservar.

Normalmente luego de la experimentación se establecen valores que sean adecuados en forma lo más global posible, sin embargo, es clara la diferencia de requerimientos entre *Pinus* sp. y *Eucalyptus* sp..

5.2.1.1 PROCESOS DE IMPREGNACIÓN

Los tratamientos protectores pueden ser superficiales, medios o profundos. Según los requisitos de profundidad de penetración del preservante, se selecciona el tipo de tratamiento de impregnación, admitiéndose diferentes tecnologías para cada tipo de tratamiento.

5.2.1.1.1 TRATAMIENTO SUPERFICIAL

Los tratamientos superficiales pueden utilizarse para las clases de uso 1 y 2.

Por otra parte, los tratamientos de inmersión controlada generalmente se utilizan cuando se requiere protección antimancha para maderas recién cosechadas y aserradas.

Los productos empleados pueden ser de naturaleza orgánica, en forma de solvente o a base de agua. La aplicación en baños cortos, túneles de aspersión y pulverización suele estar asociada principalmente con profesionales o procesos industriales, mientras que la utilización de brochas o rodillos es más común y amplia. Las regulaciones pueden imponer restricciones sobre ciertos productos en términos de uso público.

En un proceso de tratamiento por inmersión, las piezas de madera se sumergen apiladas en un recipiente que contiene el agente protector. Este agente penetra en la madera por capilaridad, alcanzando una profundidad y retención que varía según la permeabilidad de la especie de madera, la condición superficial de las piezas (si están en bruto o cepilladas, por ejemplo) y el tiempo de inmersión.

La pulverización es un método superficial que se aplica directamente en el lugar. Por otro lado, el "flow coat" es un proceso controlado que se lleva a cabo en fábricas, en líneas de producción (túnel de pulverización) o en cabinas especializadas que permite aplicar el preservante de manera uniforme y económica con poco desperdicio.

El llamado proceso flow-coat es una técnica de pulverización comúnmente utilizada en Dinamarca para aplicación de químicos acuosos en productos de carpintería como puertas y ventanas (Salminen, et al., 2014)

La pintura con pincel o brocha es el método principal accesible al público en general, pero sigue siendo muy utilizado por profesionales en diversas situaciones, como el tratamiento de cortes en obras, el tratamiento de madera laminada encolada de gran tamaño en el lugar, o el tratamiento de pequeñas series de carpintería.

5.2.1.1.2 TRATAMIENTO DE PROFUNDIDAD MEDIA

Las maderas que van a ser usadas en CU 2 a CU 3 se pueden proteger eficazmente mediante un proceso de tratamiento de baja presión/doble vacío y, en algunos mercados, tecnologías de inmersión controlada durante períodos prolongados en especies permeables (European Wood Protection Association, s.f.). Se busca una penetración mínima de 6 mm en las caras laterales de la madera de albura (Tabla 2 y Tabla 3).

Estos tratamientos se aplican generalmente a productos preservantes tipo micro emulsión a base de agua que dejan la apariencia casi sin cambios. Sin embargo, se pueden agregar tintes o pigmentos de color en el momento del tratamiento para ayudar a su identificación. Si estas maderas tratadas se utilizan en exteriores, necesitarán un revestimiento de superficie adecuado y en buen estado para mantener la protección conservante.

Ejemplos de algunos productos que pueden tratarse de esta forma: Vigas estructurales, revestimientos, entramados en estructuras, carpintería de obra, vigas de ingeniería, postes y traviesas.

5.2.1.1.3 IMPREGNACIÓN O TRATAMIENTO EN PROFUNDIDAD

En casos de aplicación en profundidad o impregnación total de la madera, ya sea en la albura o en toda la madera, con al menos 6 mm de penetración en el duramen expuesto, se requiere un proceso industrial de alta presión. Los tratamientos preservantes de alta presión generalmente se pueden utilizar para todas las CU del 1 a 5, pero son necesarios para las clases CU 3.2 al CU5

Generalmente se utilizan para la aplicación de productos de base orgánica de cobre que generalmente dejan las maderas tratadas con una coloración verde pálida que lentamente se desgasta hasta convertirse en gris plateado con el tiempo. Los tratamientos a base de CCA y los de creosota que siguen siendo una opción para algunos mercados, también se aplican con estos métodos.

Se pueden agregar colorantes en el momento de los tratamientos para producir diferentes opciones de madera tratada para diferentes mercados. También se pueden incluir repelentes de agua para agregar protección adicional contra la intemperie a las maderas decorativas exteriores.

En este tipo de tratamiento profundo, el agente protector penetra y reacciona químicamente, quedando fijado en la madera aun en condiciones de humedad o seco. Algunos productos, como los basados en boratos, no reaccionan químicamente y pueden ser lixiviados con el agua.

Ejemplos de productos que son sometidos a estos tratamientos son: Maderas de construcción en general, productos de ingeniería, maderas para cercas,

terrazas y paisajismo, parques infantiles, traviesas, postes de transmisión y durmientes.

Proceso Bethel

El proceso Bethel es la tecnología más típica para la impregnación de la madera con productos metálicos y el más comúnmente utilizado en el país.

Este proceso se lleva a cabo en autoclaves industriales, aplicando una solución acuosa de preservante mediante un ciclo de vacío y presión. La penetración del agente de impregnación en la madera se basa en el vacío creado antes del proceso, mientras que el aumento de presión incorporación de preservantes en sus capas profundas. El proceso también se denomina método de celda llena, ya que el propósito es llenar las celdas de la madera con el agente preservante para aplicar la mayor cantidad posible de producto en la madera.

El proceso Bethel comienza con un vacío preliminar, que crea un vacío también dentro de la madera. Mientras se mantiene se realiza la inyección del agente de impregnación. Al llenarse el cilindro con el preservante cae el vacío y cuando el recipiente se completa se crea una sobrepresión del orden de 8 a 14 kg/cm²³. El tiempo de sobrepresión depende de la especie y varía de minutos a horas. Después de este período, se restablece la presión normal siguiendo con un breve vacío para eliminar el exceso de producto preservante de la madera. Esto evita el goteo cuando se almacenan los paquetes de madera.

Dos parámetros importantes para el control del proceso son la retención y la profundidad de penetración del preservante. La retención, expresada en kg/m³, es la cantidad de preservante absorbido por la madera. Los requerimientos de retención para cada clase uso dependen del preservante y la especie.

Las maderas de diferentes especies tienen diferente impregnabilidad. La madera de *E. grandis*, por ejemplo, debido a su conformación anatómica, solo puede ser impregnada en la albura, cuyo espesor es variable y no suele exceder los 3 cm. Esto limita su preservación y uso a situaciones donde su durabilidad natural lo permita o donde sea fácilmente reemplazable en caso de deterioro. En cambio, la madera de pino cultivada y comercializada en Uruguay consiste mayormente en albura, que es totalmente impregnable mediante este proceso.

Proceso oscilante

Es un proceso de impregnación que se aplica a la madera recién cortada con una humedad de la madera entre 80 y 120%. El proceso de presión alterna ha sido desarrollado específicamente para la impregnación de madera de abeto⁴

³ https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/Pnacd119.pdf

⁴ impra.co.uk/impralit/vacuum-pressure-impregnation).

En el proceso de presión oscilante, el recipiente de tratamiento se inunda con solución conservante sin vacío inicial. Después de una fase de presión inicial de 30 a 60 minutos, comienza la fase de oscilación dinámica de la presión. A intervalos cortos se alternan las fases de presión y de vacío, cambiando bruscamente de una a otra. Esta fase de presión oscilante dura al menos 10 horas con un mínimo de 160 ciclos.

En el proceso de presión oscilante según Henriksson, el recipiente de impregnación se inunda con solución de impregnación sin vacío previo. Después de una fase de presión inicial de 30 a 60 minutos comienza la oscilación dinámica de la presión. La madera se expone alternativamente al vacío y a la presión, durante 10 a 22 horas con hasta 160 a 400 ciclos

Una variante de este método se conoce como proceso de Hamburgo. En este proceso oscilante no hay vacío, sino que la presión se reduce a la presión atmosférica durante cada ciclo. El contenido de humedad de la madera es de alrededor del 65% antes del inicio del tratamiento (Impra Wood Protection Ltd., s.f.) (Wolman, s.f.).

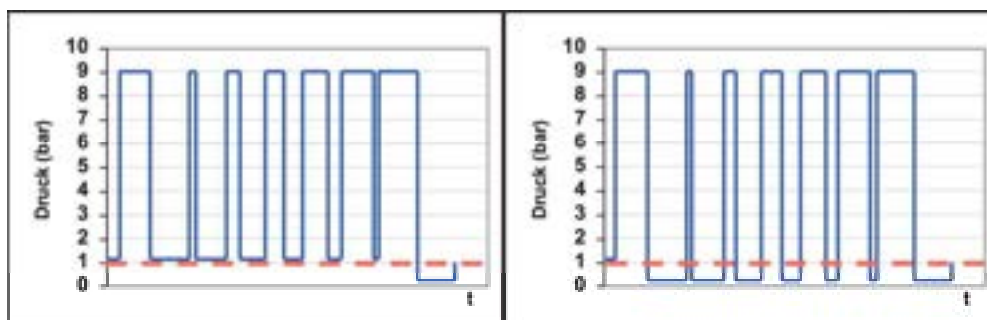


Figura 1. Diagramas del método impregnación conocido como de Presión Oscilante y su variante Proceso de Hamburg, (Wolman, s.f.)

Proceso Lowry

En el proceso Lowry, también denominado de célula vacía, la solución preservante se inyecta a baja presión en la madera que no se ha secado previamente. La madera todavía tiene algo de aire entre las células de la madera, lo que impide que penetre la solución de preservación. En el proceso Lowry, la madera absorbe menos solución de conservación en comparación con el proceso Bethel.

Es muy útil para preservar maderas permeables

Proceso Rüping

El proceso de Rüping es el método más común para impregnar la madera bajo presión con preservantes viscosos como la creosota. En este proceso, no hay un vacío inicial como en el proceso Bethel. El proceso de Rüping comienza creando una presión preliminar que suele ser de 4-5 kg/cm², comprimiéndose el

aire en las células de la madera, después de lo cual se llena el autoclave con el preservante y se comprime el aire en las celdas de la madera. Después de la impregnación, la presión vuelve a la normalidad; el aire atrapado en las células de la madera se libera expulsando el exceso de líquido de impregnación. El proceso se completa con un vacío, durante el cual se extrae de la madera todo el exceso de agente de preservación. Esto evita el goteo durante la etapa de almacenamiento. El producto final es madera cuyas paredes celulares se tratan minuciosamente (Salminen, et al., 2014).

PROCESO RÜPING MEJORADO Las modificaciones que han sido realizadas en este proceso consisten en el calentamiento rápido de la madera a una temperatura de 100°C, manteniéndose por un período de 2 horas a una presión de 4 bar. El proceso doble se inicia una vez garantizado el calentamiento completo de la carga de madera.

Proceso Royal

En el proceso Royal, después de un tratamiento según el proceso Lowry, la madera pasa a una etapa de tratamiento adicional, en el que se hierve en un baño caliente que contiene un preservante de fijación rápida. Al impregnar la madera con aceite a base de linaza, por ejemplo, se le proporciona una calidad repelente al agua duradera. Al mismo tiempo se seca la madera.

En el proceso de presión oscilante, las fases de presión y vacío se alternan en intervalos cortos. El proceso es especialmente adecuado para madera húmeda.

Proceso Vac-Vac

Este proceso se caracteriza porque la madera es sometida a dos vacíos, uno inicial que tiene como fin anular la presión del aire de los capilares de la madera con el fin de facilitar la penetración del protector, el otro vacío se aplica después de que el protector se haya introducido en la madera con el fin de retirar el excedente. Por tanto, las fases del proceso son las siguientes: Introducción de la madera en la autoclave - Vacío inicial - Introducción del protector - Vacío final.

5.2.1.1.4 NUEVAS TECNOLOGÍAS

Los procesos de tratamiento de la madera empleados para impregnar la mayoría de las maderas tratadas que se utilizan en todo el mundo datan de mediados del siglo XIX. La aparente falta de progreso en este aspecto de la protección de la madera se debe, en parte, a la capacidad limitada para superar la impermeabilidad inherente del duramen y a la eficacia general de los procesos de tratamiento existentes. El movimiento de líquidos hacia materiales con permeabilidad diferencial, como la madera, está impulsado por

unos pocos factores que incluyen la longitud del recorrido del flujo, la viscosidad del fluido de tratamiento, las diferencias de presión entre la superficie y el interior de la madera y el tamaño del poro o vía más pequeña. De estos factores, el tamaño del poro más pequeño es el factor dominante. Es difícil alterar uniformemente los tamaños de los poros, aunque el uso de prácticas como la incisión, busca subvertir esta limitación al exponer más vías longitudinales (Morrell, 2019).

El otro factor que ha limitado el desarrollo de nuevos procesos ha sido el buen desempeño de los materiales tratados adecuadamente. A pesar de la aceptación general de los procesos existentes, existe una oportunidad considerable tanto para mejorar la calidad del tratamiento de tal manera que sea menos probable que migre hacia afuera una vez que esté en uso (Morrell, 2019).

Al mismo tiempo, sigue siendo necesario contar con nuevos procesos de tratamiento que permitan una penetración más eficaz de los preservantes. Si bien la mayoría de las especies de madera de coníferas tratadas a nivel mundial tienen alta proporción de albura fácilmente impregnable, hay muchas especies como el *E. grandis*, con grandes proporciones de duramen que resisten la impregnación.

Superwood™

Es un nuevo método de impregnación desarrollado en Dinamarca, basado en la impregnación mediante CO₂ supercrítico. Los SCF tienen la capacidad de solubilizar sustancias químicas como un líquido, pero pueden moverse a través de la madera como un gas.

Se añaden CO₂ y preservantes de madera al recipiente y se aumenta la presión. Al sobrepasarse el Punto crítico (presión y temperatura críticos), cambian las propiedades de los fluidos pasando a una "fase supercrítica", donde el CO₂ actúa como vehículo para introducir el preservantes en la madera. La presión vuelve a la normalidad y el proceso se completa. El exceso de CO₂ y el preservantes de la madera se recoge y recicla.

Este proceso tiene una gran ventaja, la madera queda impregnada por completo, pero permanece relativamente seca durante todo el proceso sin cambios dimensionales. Por otra parte, el consumo volumétrico de productos químicos puede ser menor en comparación con los métodos convencionales (Salminen, et al., 2014).

Estos atributos tienen un enorme potencial para producir productos de madera completamente tratados. Este proceso solo se utiliza comercialmente en Dinamarca y se ha explorado en otros lugares, pero los altos costos inversión han limitado en gran medida el desarrollo (Morrell, 2019).

Tru-core

Existe la tecnología patentada como TRU CORE de Kop-Coat Protection Products y disponible comercialmente. Se trata de un sistema de tratamiento con óxido de amina tamponada, que se desarrolló en 2004 para abordar la necesidad de un proceso de conservación de madera moderno y de última generación que pueda penetrar rápidamente en todos los perfiles de madera maciza y sustratos de madera industrializada que no se pueden tratar con métodos tradicionales. (Clawson, 2015). La penetración y la unión se controlan utilizando un sistema de amortiguación adecuado que amortigua los ácidos naturales presentes en la madera. En la mayoría de los casos, se utilizan boratos para el sistema de amortiguación (Ross & Cutler, 2011)

El uso de estos productos químicos en el sistema de amortiguación puede contribuir a una actividad biocida adicional del sistema. Además, se ha documentado y patentado la eficacia sinérgica de los boratos y los insecticidas piretroides sintéticos, así como otras combinaciones químicas del sistema de tratamiento con óxido de amina amortiguado (Ward, et al., 2003) (Ross, et al., 2006) Los biocidas convencionales se incorporan al sistema químico de tratamiento con óxido de amina amortiguado y luego se aplican a la madera utilizando técnicas estándar como inmersión, inundación, pulverización, pulverización en línea e impregnación asistida por presión/vacío. En el caso de la impregnación a presión/vacío, los tiempos de ciclo y las presiones añadidas se minimizan drásticamente cuando se complementa con la tecnología del sistema de tratamiento de óxido de amina tamponada. (Pepin, et al., 2019) evaluó en forma independiente estos tratamientos con mejoras sinérgicas en la durabilidad y mejoras en la estabilidad dimensional que no pudieron ser del todo explicadas.

Kop-Coat Protection Products tiene experiencia en el suministro de tecnología para tratar una variedad de eucaliptos. En Australia, se tratan alrededor de 20 tipos diferentes de eucalipto con azoles/permetrina a base de agua utilizando la tecnología TRU-CORE.

La tecnología TRU-CORE se puede agregar a todos los preservantes de madera (excepto el naftenato de cobre). Esto incluye azoles de cobre, que de cobre y, lo más importante, azoles/permetrina a base de agua (WBAP) (propiconazol, tebuconazol, permetrina). WBAP es el preservante recomendado por la compañía para toda las clases de uso sobre el suelo. El producto no produce cambios de color no deseados en la fibra y cuenta con más de 20 años de datos de rendimiento en pruebas aceleradas en condiciones tropicales.

El programa TRU-CORE WBAP se está empleando actualmente en Australia, Nueva Zelanda y los EE. UU./Canadá en una variedad de maderas de latifoliadas y coníferas, incluidos los eucaliptos.

Pretratamiento con ultrasonido

Existen algunos tratamientos como el ultrasonido que aún están en fase de investigación y que han sido estudiados con éxito en *E. grandis* a escala laboratorio para mejorar el proceso de secado de maderas con tendencia al colapso, mejorando el flujo del agua por los elementos celulares conductores, ya sea abriendo las punteaduras aureoladas o removiendo los depósitos de extractivo (Liu, et al., 2018).

5.2.1.2 PRESERVANTES

La industria de los preservantes nace hace aproximadamente doscientos años y desde entonces han aparecido diferentes generaciones de preservantes en la búsqueda de mejorar eficacia, permanencia y disminuir impactos no deseados en salud y medio ambiente.

Para que un preservante pueda ser aplicado industrialmente debe cumplir con ciertos requisitos mínimos y otros deseables:

1. Tener actividad biocida sobre los agentes frente a los cuales se espera protección
2. Rentable:
 - a. El precio de mercado del preservante y la dosis (retención) requerida para ser eficaz deben ser lo suficientemente bajas y para que su costo no lo inviabilice
 - b. El costo de desarrollo y el tiempo que insume antes de llevarlo al mercado deben estar balanceados en relación al precio de mercado, probabilidad de éxito y el potencial de ganancia.
3. Seguridad para los humanos y el ambiente durante el proceso, durante la manipulación del producto tratado, a lo largo de su vida en servicio y luego del fin de su vida útil.
4. Estabilidad del concentrado y de la solución preservante. El preservante formulado debe poder transportarse, almacenarse y aplicarse sin producirse cambios en su composición.
5. Difusión. Tiene que penetrar la madera a la profundidad requerida en las condiciones de proceso.
6. El proceso de aplicación debe ser robusto, dando lugar a producto con calidad uniforme
7. Estabilidad del preservante en la madera. El producto no puede cambiar su composición perdiendo actividad durante su uso
8. Corrosión: Es deseable que el producto no reaccione químicamente con herrajes durante su uso.
9. Permanencia. Debe permanecer en la madera sin volatilizarse o deslavarse durante el uso para el cual fue diseñado

10. No debe afectar significativamente las propiedades mecánicas de la madera
11. No debería afectarla estéticamente dejando olores persistentes o colores o manchas no deseados.

La evolución de este sector va detrás de las industrias farmacéutica y de agroquímicos, industrias que lideran la búsqueda de principios activos con alto poder biocida pero bajo impacto en la salud humana y el ambiente. Los procesos de desarrollo y validación así como los procesos de registro, con todos los estudios requeridos son largos y costosos, lo que lleva a unas pocas compañías grandes que lideran el mercado de los preservantes. El pago de royalties o la caducidad de las patentes habilita a las empresas menores a adoptar las nuevas tecnologías.

El precio de un nuevo preservante es inevitablemente comparado con los existentes en el mercado que han probado ser eficaces.

Los precios de los preservantes a base de metales están ligados a la variación del precio internacional. Las Figura 2 y Tabla 4 muestran una tendencia al alza del cobre, cuatriplicándose su precio entre 2000 y 2021.

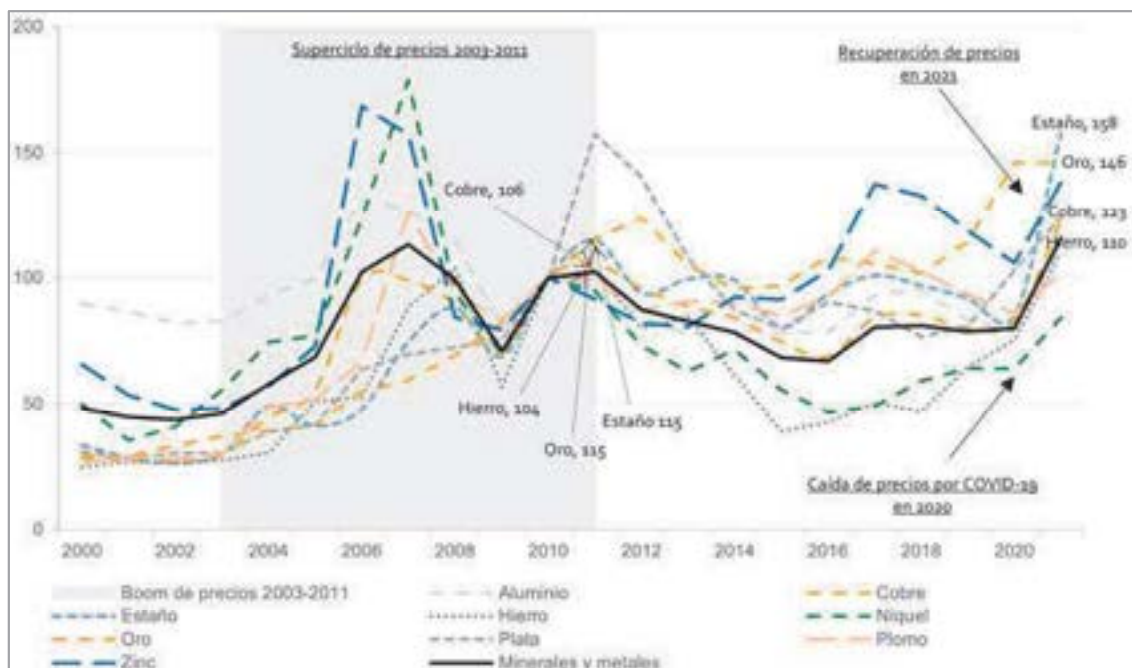


Figura 2. Evolución de precios de metales y minerales según la CEPAL (<https://www.cepal.org/es/enfoques/evolucion-precios-recursos-naturales-exportacion-america-latina-caribe>). Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), sobre la base estadística del World Bank Commodity Price Data (The Pink Sheet) [base de datos en línea] <https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets>.

Tabla 4. Evolución de precios del cobre según la CEPAL. CEPAL (<https://www.cepal.org/es/enfoques/evolucion-precios-recursos-naturales-exportacion-america-latina-caribe>). Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), sobre la base estadística del

Precio real (año 2010)	2000	2005	2010	2015	2019	Variación % 2019-2020	2020	Variación % 2020-2021	2021
Cobre (US\$/tonelada)	2.279	4.194	7.535	5.631	6.042	3,2	6.237	48,8	9.264

Business Analytiq (<https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/boric-acid-price-index/>) presenta el precio del ácido bórico en febrero de 2025 y su tendencia en cuatro regiones:

- América del Norte: 0,93 USD/kg, una caída del 2,1 %
- Europa: 1,14 USD/kg, una caída del 1,7 %
- Noreste de Asia: 0,99 USD/kg, una caída del 2 %
- América del Sur: 0,79 USD/kg, una caída del 2,5 %

La tendencia y perspectivas del precio del ácido bórico resumidas a continuación muestran un aumento significativo entre el 2021 y 2023 en todas las regiones seguido de una tendencia general a la baja (Figura 3)

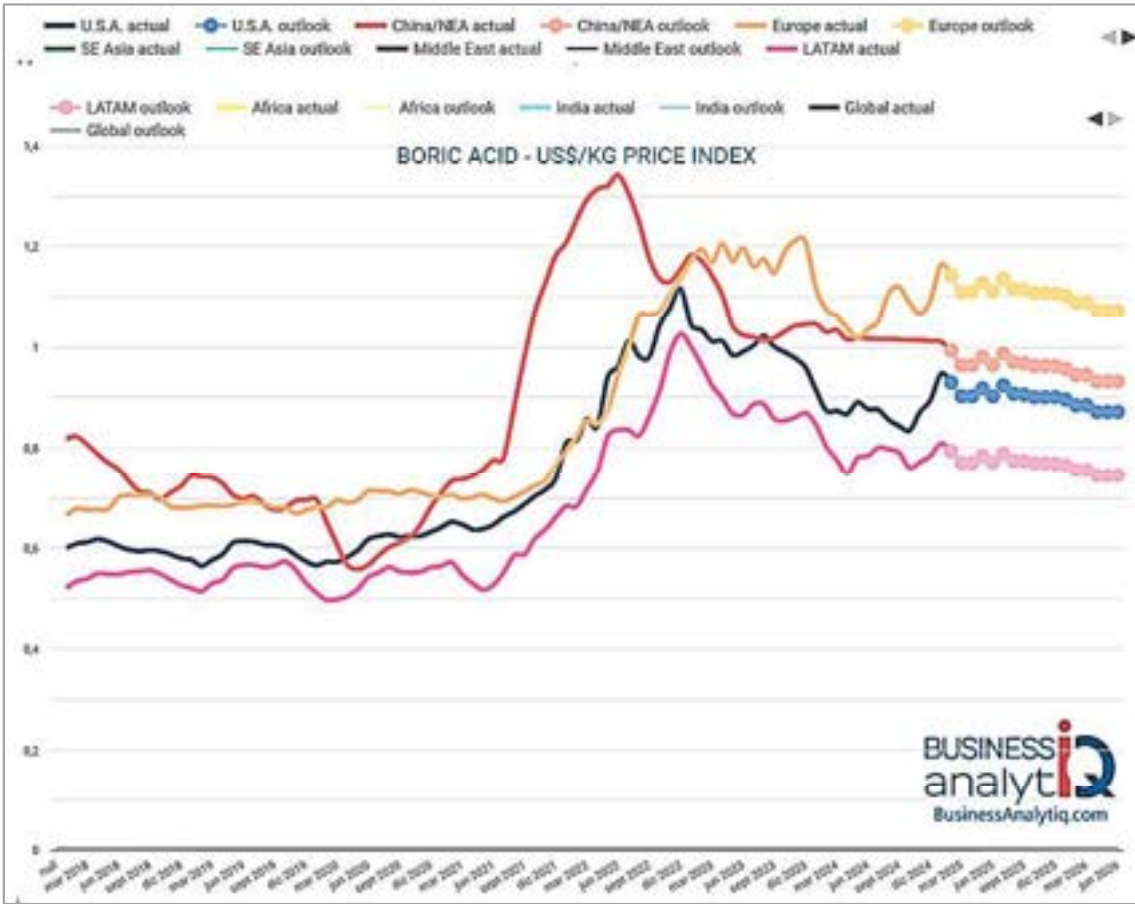


Figura 3. Precio histórico del ácido bórico (USD/kg) y proyección para el 2026 según Business Analytiq (<https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/boric-acid-price-index/>)

En la Tabla 5 se listan los principales preservantes registrados en las normas AWWA de Norteamérica.

Tabla 5. Listado de preservantes normalizados por la Asociación de Impregnadores de Madera Americanos AWWA,

PRESERVANTE	SOLVENTE	NORMA
CR, creosota	OLEOSO	P1/P13-19
CR-S	OLEOSO	P2-19
CR-PS	OLEOSO	P3-19
PCP, PENTACLOROFENOL	OLEOSO	P35-16
NAFTENATO DE COBRE (CuN)	OLEOSO	P36-16
NAFTENATO DE COBRE (CuN-W)	ACUOSO	P34-14
CCA – C	ACUOSO	P23-14
ACZA	ACUOSO	P22-14
AAC-W	ACUOSO	P24-19
ACQ-A	ACUOSO	P26-14
ACQ-B	ACUOSO	P27-14
ACQ-C	ACUOSO	P28-14
ACQ-D	ACUOSO	P29-14
CA-B	ACUOSO	P32-19
CA-C	ACUOSO	P48-15
MCA	ACUOSO	P61-16
MCA-C	ACUOSO	P62-16
Cu HDO o CX-A	ACUOSO	P33-18
Cu8	OLEOSO	P37-17
SBX	ACUOSO	P25-16
SBX-O	OLEOSO	P60-14
KDS	ACUOSO	P55-16
KDS-B	ACUOSO	P56-19
IPBC	OLEOSO	P40-19
IPBC/PPZ/TEB-SB-1	OLEOSO	P53-15
PTI	ACUOSO	P45-14
DCOI	OLEOSO	P39-18
EL2	ACUOSO	P47-14

5.2.1.2.1 PRESERVANTES DE PRIMERA GENERACIÓN EN FORMULACIONES CON BASE DE ACEITE

En general, los preservantes con base en aceite pueden dejar las superficies de madera tratada con texturas pegajosas o incluso exudando aceite. Además, usualmente el aceite empleado como solvente de soporte durante el tratamiento a presión le confiere a la madera tratada un olor que puede generar molestias. Por último, la madera tratada con preservantes en base aceite que queden inmersos en agua pueden dejar un brillo aceitoso en la

superficie del agua. Todos estos problemas no se dan en general con maderas tratadas con los preservantes de base acuosa aplicados bajo presión.

Por otro lado, un beneficio importante del aceite de los preservantes es que inherentemente repele al agua, lo que reduce la descomposición y previene la congelación en climas muy fríos. Los aceites también lubrican la madera, manteniéndola suave y flexible, evitando rajaduras y que se parta. Por último, los postes de servicios públicos sobreviven mejor a los incendios cuando se emplean preservantes al aceite en lugar de los de base acuosa.

Si bien el aceite en los preservantes repele el agua, en contacto con ésta hay más lixiviación que en el CCA-C por la fijación de éste a la madera.

01 CREOSOTA

La creosota, desarrollada hace unos 200 años, es un destilado viscoso de alquitrán de hulla, que consiste en una mezcla compleja de más de 200 compuestos orgánicos, principalmente hidrocarburos poliaromáticos junto con otros compuestos fenólicos y básicos. La composición y cantidad de cada compuesto depende de la materia prima de carbón y del proceso de destilación. La creosota es más pesada que el agua y tiene un rango de ebullición que comienza alrededor de los 200 °C. (Schultz & Nicholas, 2011)

La creosota se puede utilizar pura (CR), en solución (CR-S) o diluida con aceite de petróleo (CR-PS). Generalmente se calienta para reducir la viscosidad y luego el líquido de creosota se inyecta a presión en la madera.

Se ha utilizado con éxito como preservante durante más de un siglo. Los productos de madera tratados con creosota han establecido un récord de desempeño a largo plazo y una reputación de seguridad y confiabilidad, con bajo impacto ambiental total (Western Wood Preservers Institute, 2023).

Es un preservante de alto desempeño de uso restringido. Se utiliza para situaciones de alta exigencia principalmente para durmientes, postes de servicios públicos, pilotes marinos y traviesas (Schultz & Nicholas, 2011).

La creosota representaba en 2011 alrededor del 15% del mercado total de madera tratada en América del Norte (Schultz & Nicholas, 2011).

Preservative manufacturers:, Koppers, Inc., Lone Star Specialty Products, Rain Carbon, Inc.

02 PENTACLOROFENOL

El Pentaclorofenol (PCP) es un fenol policlorado desarrollado en 1930. Generalmente se disuelve en un vehículo de aceite pesado o liviano y se usa principalmente para tratar postes y crucetas de servicios públicos. Los vehículos de aceite pesado brindan protección adicional contra los basidiomicetos, pero no contra los hongos de pudrición blanda, y también reducen la lixiviación (Schultz & Nicholas, 2011). Es conocido por alta efectividad contra la pudrición y son conocidos registros de postes en servicio durante 70 años o más (Western Wood Preservers Institute, 2023).

PCP es un pesticida de uso restringido, muy utilizado para usos exigido como postes de servicios (Khademibami & Bobadilha, 2022).

03 NAFTENATO DE COBRE

El naftenato de cobre (CuN) se obtiene a partir de cobre y ácido nafténico, un subproducto de la refinación del petróleo. Se produce a partir de la reacción de cobre con ácido nafténico, un subproducto en la refinación de petróleo. Pertenece al grupo de los carboxilatos de cobre.

Es un preservante del tipo oleoso que puede ser vehiculizado con solventes orgánico, pero también formulado con etanolamina de forma solubilizarse en agua. Aunque es más efectivo de la primer forma, también se ha empleado en base acuosa. Los productos tratados con este producto se manipulan en forma "limpia" sin residuos oleosos.

Se ha usado como preservante desde 1889 y reconocido por las AWP standards desde 1949, pero a partir de 1980, con un desempeño para aplicaciones de infraestructura comprobado, su interés aumenta como sustituto del PCP (Freeman, et al., 2003). Este producto es levemente menos efectivo que el PCP, pero 10 veces menos tóxico para el ser humano (Khademibami & Bobadilha, 2022). El CuN en base aceite no tiene una demanda de mercado comparable a los otros preservantes en base aceite. Esto podría estar asociado a un historial de fallas tempranas de los postes tratados con CuN, algo que en la actualidad ha sido resuelto, alcanzando una tasa de fallo equivalente a la de postes tratados con PCP. Los fabricantes han perfeccionado las prácticas de tratamiento para el CuN durante las últimas dos décadas para garantizar que los productos de madera brinden una larga vida útil en condiciones exigentes.

Debido a su eficacia y perfil toxicológico, el CuN fue identificado como la alternativa óptima a las traviesas y vigas de puentes tratadas con creosota (Lombard y Kubiczki, 2011 en (Koch & Manning, 2021)). El Departamento de Transporte de New Hampshire (EE. UU.) inició un estudio para revisar la información de modo que los futuros trabajos en vigas de puentes pudieran completarse de una manera que optimizara el desempeño y eliminara los daños al medio ambiente por el uso de la creosota. De los siete productos evaluados, se recomendaron dos para las vigas de puentes ferroviarios: CuN y creosota, siendo el CuN el preferido en entornos acuáticos sensibles y donde el goteo del preservante es una preocupación.

Clasificado por la EPA como un conservante de uso general, el CuN también se aplica ampliamente como tratamiento *in situ* en cortes en extremos o agujeros perforados en madera tratada a presión durante la construcción (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2014) (Western Wood Preservers Institute, 2023).

5.2.1.2.2 SISTEMAS ACUOSOS

Los productos químicos a base de agua se introdujeron en el mercado en la década de 1950. Este vehículo tiene como ventajas su costo, seguridad para el manejo y normalmente proporciona una superficie limpia en la madera tratada (Schultz y Nicholas, 2004). La madera preservada con productos químicos a base de agua se puede pintar después del tratamiento y también se puede utilizar en una gama más amplia de aplicaciones, como postes de servicios públicos, madera residencial y madera aserrada, así como para la protección de compuestos de madera. Los

tratamientos a base de agua incluyen preservantes arsenicales, de cobre no arsenicales y no metálicos (Khademibami & Bobadilha, 2022).

5.2.1.2.3 SISTEMAS DE PRIMERA GENERACIÓN A BASE DE COBRE Y ARSÉNICO

El cobre es un micronutriente esencial para el desarrollo de plantas y animales. Sin embargo, en dosis más altas, el cobre puede actuar como un preservante contra hongos de pudrición bacterias, moho y algas. El uso del cobre en la industria de la preservación data de más de cien años. A pesar del desarrollo de otros biocidas el cobre sigue siendo el componente biocida más importante utilizado para proteger la madera (Lebow, 2007). Se han publicado numerosos manuscritos y artículos de investigación sobre el uso de sistemas a base de cobre para diferentes aplicaciones.

El arsénico y sus compuestos se encuentran de forma natural en la corteza terrestre, por lo general en bajas concentraciones. El arsénico se libera al aire a través de los volcanes y de la erosión de minerales que contienen arsénico. Por su conocido poder insecticida ha sido utilizado en la preservación de la madera.

01 CCA

El CCA tiene tres componentes principales: cobre, arsénico (como insecticida) y cromo como inhibidor de corrosión, agente de fijación y co-biocida. El CCA fue patentado por Kamesam en 1938 y debido a su excelente desempeño en múltiples condiciones de uso, su bajo costo y la sencillez del proceso de impregnación ha tenido un rol muy importante en el siglo XX y aún al día de hoy en muchas regiones del mundo. Su fijación química a la madera reduce el potencial de migración del producto al suelo y aguas subterráneas

La AWWA estandarizó este producto bajo tres presentaciones: tipo A en 1953, tipo B en 1964 y tipo C en 1969. Los tres tipos difieren en su proporción y forma de presentación de Cu, Cr y As. Actualmente, domina el mercado el tipo C con sus componentes bajo forma de óxidos. (Freeman, et al., 2003).

Fue el preservante de base acuosa predominante y como se explica más adelante actualmente, en varios países está restringido a ciertos usos no residenciales.

Un sistema ácido adicional, el cromato de cobre ácido (Celcure™), fue patentado en 1928 por Gunn y se estandarizó en 1950.

02 ACA y ACZA

El otro preservante arsenical importante, el arseniato de cobre amoniacoal (ACA), se estandarizó en 1950. Conocido con el nombre comercial Chemonite™, se modificó reemplazando parte del arsénico con zinc; esta fórmula se conoce como ACZA. Contienen una base de nitrógeno para solubilizarlo, como agente de fijación e inhibidor de corrosión.

Es particularmente eficaz para especies difíciles de impregnar, refractarias, como el Douglas fir (Freeman, et al., 2003)

La madera preservada con ACZA se ha utilizado generalmente para productos industriales (Freeman, et al., 2003); se utiliza a menudo en entornos acuáticos, muelles, embarcaderos y aplicaciones donde estará expuesta al agua. Los productos de infraestructura tratados con ACZA protegen contra las principales causas de

degradación de la madera: descomposición y termitas (incluidas las de Formosa), organismos marinos, hormigas carpinteras y pájaros carpinteros (Western Wood Preservers Institute, 2023)

5.2.1.2.4 SISTEMAS DE SEGUNDA GENERACIÓN A BASE DE COBRE

Otro tipo preservantes contienen cobre como principal elemento fungicida y una o varias moléculas orgánicas con propiedades biocidas en una base nitrogenada para disolverlo, como agente de fijación e inhibidor de corrosión (Khademibami & Bobadilha, 2022).

01 ACQ

El amonio cuaternario alcalino de cobre (ACQ) es un complejo soluble de cobre(II) y compuestos de amonio cuaternario sustituidos con alquilo o arilo ("quats"). Es un preservante hidrosoluble vehiculizado en un complejo de aminas que se aplica por tratamiento vacío-presión. Es una fórmula combinada que contiene entre un 50 y un 67 % de óxido de cobre y entre un 33 y un 50 % de compuesto de amonio cuaternario con múltiples variaciones en su composición, a saber, ACQ-A, ACQ-B, ACQ-C y ACQ-D (Khademibami & Bobadilha, 2022) (American Wood Protection Association, 2019).

Los amonios cuaternarios tienen una amplia actividad contra una amplia variedad de hongos e insectos que provocan la descomposición y el moho, y una baja toxicidad para los mamíferos y, aunque son solubles en agua, se vuelven relativamente resistentes a la lixiviación a través de reacciones de intercambio iónico con la madera. Sin embargo, pueden ser degradados por bacterias y tienen una actividad biocida moderada. Como resultado, es necesario un co-biocida para brindar protección suficiente (el cobre) (Schultz & Nicholas, 2011)

Las formulaciones incluyen cationes carbonato para reducir la corrosión del metal en la instalación de tratamiento (en relación a la formulación original con ion cloruro). Este cambio no tuvo ningún efecto sobre la eficacia (Schultz & Nicholas, 2011)

Lebow (2007) señaló que el ACQ puede penetrar en especies de madera que se clasifican como difíciles de tratar. Por ejemplo, Pang et al. (2017), que investigaron el efecto de la incisión en la resistencia del ACQ, concluyeron que la vida útil de la madera tratada con ACQ puede ser de más de 50 años según los resultados de las pruebas de lixiviación. Más recientemente, Adnan et al. (2021) investigaron el impacto del tratamiento con ACQ en la calidad de la superficie y el rendimiento de la unión de elementos de madera de latifoliadas y CLT encontrando que no hay afectación del producto en las propiedades de resistencia o de la unión (Khademibami & Bobadilha, 2022).

De acuerdo a Koppers (comunicación verbal, 2024) el ACQ aplicado a maderas en condiciones en las que se favorezca el incremento en el contenido de humedad, no la protege de la pudrición marrón ; al mismo tiempo es un producto que genera problemas operativos en plantas de impregnación debido al alto pH de solución de tratamiento.

02 CA

El otro preservante principal a base de cobre que se utiliza en aplicaciones residenciales en América del Norte son las formulaciones de azoles de cobre (CA), en las que el cobre

se combina con niveles relativamente bajos de uno o dos triazoles. Los azoles pueden ser tebuconazol (CA-B) o una mezcla de tebuconazol-propiconazol (CA-C).

Los azoles tienen una eficacia extremadamente alta contra la mayoría de los hongos basidiomicetos de pudrición parda y blanca, pero son por sí solos ineficaces contra mohos, hongos de pudrición blanda e insectos. Como resultado, se utilizan normalmente en combinación con cobre u otros co-biocidas. Además, los azoles pueden ser biodegradados por bacterias y mohos que habitan en la madera, y el tebuconazol parece relativamente débil contra los hongos tolerantes al cobre. Los azoles se formulan fácilmente en hidrocarburos o como una emulsión de aceite en agua, o en complejos a base de aminas para sistemas a base de agua, y son relativamente resistentes a la lixiviación (Schultz & Nicholas, 2011)

Existen varias formulaciones de sistemas de CA solubilizados que se han estandarizado en América del Norte, incluida una que contiene boro. El boro es un insecticida y fungicida eficaz, pero se lixivia con relativa rapidez de la madera expuesta. (Schultz & Nicholas, 2011)

03 Compuestos con Cu-HDO, CX

El Cu-HDO es un fungicida con alta eficacia frente a hongos basidiomicetos y bajo efecto en organismo "no objetivo". Cu-HDO. Para mejorar su eficacia frente a hongos de pudrición blanda se le combina con hidroxicarbonato de cobre. Para solubilizar en agua se le agregan compuestos a base de aminas. Esto le otorga un pH alcalino, que al ser impregnado en la madera desciende, causando la precipitación y fijación de los dos compuestos de cobre. El Cu HDO resiste por lo tanto el deslavado y es muy respetuoso del ambiente y de la salud (Goettsche, 2003).

El preservante CX está constituido entonces por la molécula Bis-(N-cilohexildiazoniumdioxi)-cobre e hidroxi-carbonato de cobre solubilizados en agua a través del agregado de complejos a base de aminas

CX se ha utilizado en Europa durante más de 30 años. Se presenta bajo diferentes formulaciones. La formulación registrada en AWPA como CX-A tiene adicionalmente el agregado de boro como ácido bórico. Es comercializado en diferentes partes del mundo como Wolmanit CX-8 conteniendo Es altamente efectivo contra hongos descomponedores, agentes de pudrición blanda e insectos. Según Schultz y Nicholas (2007), el borato se lixivia con relativa rapidez y el cobre no complejoado también puede lixiviarse. Por otra parte se verificó que la madera de pino tratado a presión con cobre-HDO no pierde resistencia y por lo tanto, podía utilizarse en aplicaciones estructurales (Khademibami & Bobadilha, 2022).

K-HDO

Existe una variante, la sal de potasio de ciclohexilhidroxidiazeno 1-óxido (K-HDO) se usa en biocidas para la protección de compuestos de madera (fibras, aglomerados, etc.) contra hongos basidiomicetos que destruyen la madera. Las principales aplicaciones de los productos compuestos de madera tratados con K-HDO se encuentran en la construcción de techos y al aire libre bajo techo.

El producto comercializado como Xyligen® 30 F es aplicable para interiores pero también la clase de uso 3.1, donde una humedad ambiental alta puede provocar un

mojado ocasional pero no persistente. La aplicación de K-HDO en compuestos de madera está prevista para la construcción, sistemas industriales completamente automatizados e incluso para la línea de cola (Wolman, s.f.)

04 Cu-8

El (bis) cobre-8-quinolinolato u oxina de cobre (Cu-8) es un biocida organometálico utilizado desde 1950. Puede disolverse en solventes de hidrocarburos, pero brinda protección más prolongada cuando se suministra en petróleo pesado y, si bien existe una forma soluble en agua a partir de ácido dodecil-bencensulfónico, dicha formulación corroe los metales (Lebow, 2006)

Presenta una toxicidad aguda para los mamíferos extremadamente baja, excelente estabilidad y resistencia a la lixiviación, y amplia actividad contra hongos e insectos que provocan la descomposición.

De acuerdo a las normas AWP, requiere significativamente menores niveles de cobre que otros preservantes, para aplicaciones sin contacto con el suelo. Es muy utilizado para control de hongos de mancha y mohos. Es utilizado para la protección de tablero y según (Schultz & Nicholas, 2011) actualmente es el único biocida incluido en las normas de la AWP y el CFR (Código de Registro Federal) para aplicaciones en las que la madera tratada puede entrar en contacto con alimentos, como en los contenedores de frutas y verduras. Se vende también para aplicaciones con brocha en uso doméstico.

05 FORMULACIONES A BASE COBRE MICRONIZADO: MCA y MACQ

El cobre también se aplica en partículas de $\text{CuCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$ de tamaño menor o igual a 0,2 mm en preservantes comúnmente conocidos como cobre micronizado (Khademibami & Bobadilha, 2022) (Schultz, et al., 2008). Fueron aprobados por el Servicio de Ingeniería del Consejo de Códigos Internacionales (ICC ES) y comenzaron a aplicarse después de 2010. En términos de desempeño, los sistemas de cobre micronizado tienen resultados similares o superiores en comparación con los sistemas basados en cobre iónico para proteger la madera de la biodegradación, las formulaciones de cobre micronizado tienen menores costos de producción, mayor resistencia a la lixiviación (Platten, et al., 2014) y menores problemas de corrosión del acero inoxidable y los sujetadores galvanizados por inmersión en caliente (Khademibami & Bobadilha, 2022). Por otra parte, dado que las fórmulas particuladas están más concentradas en cobre, tienen menores costos relativos de envío.

El azol de cobre micronizado (MCA o MCA-C), el quat de cobre micronizado (MACQ) y las formulaciones de nanopartículas de óxido de cobre y óxido de zinc se han aplicado en muchos productos de madera y derivados de la demostrando buena resistencia a la lixiviación y un excelente rendimiento de durabilidad (Khademibami & Bobadilha, 2022). La diferencia entre en MCA y MCA-C consiste en la composición de azoles, tebuconazol en el primer caso y una mezcla tebuconazol y propiconazol en el segundo.

06 PRODUCTOS A BASE DE BORO

i DOT, SBX, ZnB

Los boratos [bórax, ácido bórico, tetra o pentaborato de sodio, tetrahidrato de octaborato de disodio (DOT), borato de sodio (SBX)] son biocidas inorgánicos, generalmente formulados como una mezcla de bórax y ácido bórico en un sistema a

base de agua. Los boratos tienen una toxicidad extremadamente baja para los mamíferos y una larga historia de buena eficacia contra hongos e insectos que destruyen la madera y brindan resistencia al fuego a la madera tratada. No son corrosivos para los sujetadores de metal; son incoloros y la madera tratada se puede teñir o pintar una vez seca y (Schultz & Nicholas, 2011).

Sin embargo, los boratos se lixivian fácilmente en la exposición al aire libre y, por lo tanto, solo están estandarizados para aplicaciones UC1 en interiores, no expuestas, o exposición UC2 si la madera está pintada (Schultz & Nicholas, 2011).

Se han realizado muchas investigaciones para encontrar un sistema de borato no lixiviable, pero hasta ahora los resultados no han sido satisfactorios. Varias empresas han afirmado haber desarrollado un proceso de borato/silicato que fija el borato. Sin embargo, no existen datos independientes de exposición de campo a largo plazo que verifiquen la eficacia de estos denominados "sistemas de borato fijo" en pruebas apropiadas (Schultz & Nicholas, 2011).

Freeman et. al (2003) destacan a los compuestos de boro como unos de los sistemas de preservación de la madera más eficaces y versátiles disponibles en la actualidad, ya que combinan las propiedades de eficacia de amplio espectro y baja toxicidad aguda para los mamíferos. Los productos tratados con boratos incluyen los siguientes: madera y madera contrachapada, tableros de virutas orientadas (OSB), revestimientos, madera industrializada, compuestos de madera y plástico, carpintería, ventanas, puertas, muebles, postes telefónicos, traviesas de ferrocarril y casas de troncos. Tiene gran potencial para la protección de los productos de madera masiva (mass timber).

Según Schultz y Nicholas (2011) y Lebow (2007), el principal producto utilizado para proteger composites es el borato de zinc (ZnB), el cual se encuentra normalizado según AWWA (P51-14) y es recomendado como aditivo en los adhesivos utilizados en los productos de madera. El borato de zinc es un polvo blanco, inodoro y poco soluble en agua que se añade directamente a la madera o a la cera durante la fabricación del panel. Tiene una mayor resistencia a la lixiviación que las formas más solubles de borato utilizadas para el tratamiento a presión, por lo que se puede utilizar para tratar productos de revestimiento compuesto que están expuestos al aire libre pero parcialmente protegidos de la intemperie.

ii DPAB

Son sistemas a base de betaína polimérica. DPAB (borato de didecilpolioxietilamonio) es un éster bórico que al ser aplicado a la madera se descompone en DDAC (cloruro de didecildimetilamonio) y ácido bórico. Debido a su estructura única, la betaína polimérica existe como una mezcla en equilibrio de monómeros y dímeros dependiendo de la concentración, el pH y otros factores.

Fue desarrollada en la década de los 80 como co-biocida para preservantes sin cromo para mejorar su penetración y distribución. Luego se encontró su que tenía actividad protectora frente a hongos resistentes al cobre y adicionalmente un efecto sinérgico con el cobre, comprobándose también protección frente a insectos incluyendo termitas y una excelente fijación del producto en la madera (Härtner, et al., 2008).

La betaína alcalina de cobre (KDS) es un preservante de alta resistencia para aplicaciones de presión-vacío registrado en AWWA hasta la clase de uso 4. Se compone

de betaína polimérica (DPAB), cobre y ácido bórico. Una variante es la betaína alcalina de cobre tipo B (KDS-B) libre de boro. Otra presentación de la betaína polimérica es TSK es una formulación libre de metales destinada al tratamiento por inmersión de madera estructural (sistema de entramado de madera) y otras aplicaciones. TSK está compuesto por betaína polimérica y fenoxicarb como activos.

El **fenoxicarb** es un carbamato aromático que funciona como regulador en el crecimiento de insectos. Actúa por contacto e ingestión como un análogo de la hormona juvenil, evitando que los insectos inmaduros alcancen la madurez (Syngenta, 2021).

Presentaciones comerciales: Impralit™ KDS, Impralit™ KDS-B, Impralit™ TSK.

Fue registrada como ingrediente activo en los EE. UU. en 2006. KDS-B es aplicado por tratamientos de vacío-presión, mientras que KDS se aplica sin presión, pudiéndose utilizar para tableros derivados de la madera.

DPAB tiene propiedades únicas como preservante de madera. Debido a la estructura de su forma dimérica, la betaína presenta un gradiente de distribución plano en la madera tratada a presión y una mejor penetración para productos de tratamiento por inmersión. La presencia de grupos hidroxietilo en la molécula permite la formación de enlaces de hidrógeno con los componentes de la madera, además de otras interacciones físicas y fisicoquímicas presentes en los compuestos de amonio cuaternario convencionales.

El DPAB tiene gran desempeño frente a insectos y hongos descomponedores (incluyendo hongos tolerantes al cobre) y una excelente eficacia como activo para aplicaciones anti-mancha (Härtner, et al., 2008).

Uno de los atributos más importantes del DPAB como preservante de madera es probablemente su idoneidad para la protección de compuestos de madera. OSB fabricado a partir de astillas tratadas con DPAB tiene una mayor resistencia mecánica que cuando las astillas no son tratadas. El glulam⁵ tratado con KDS presenta una menor delaminación que la madera no tratada (Härtner, et al., 2008).

07 TBTO

El óxido de tributilestaño (TBTO) es un biocida organometálico que muestra una buena actividad contra hongos e insectos. Protege frente a organismos marinos, lo que lo hace ideal para entornos acuáticos.

Se formula fácilmente con hidrocarburos.

Se utiliza como tratamiento a base de solvente o aceite sobre el suelo para carpintería en América del Norte y Europa.

No colorea la madera ni reduce sus propiedades de resistencia

⁵ Glulam es también conocido como MLE, madera laminada encolada, material estructural de madera compuesto por láminas de madera unidas con adhesivos

Tiene buena resistencia a la lixiviación. Sin embargo, sufre una desalquilación relativamente lenta con la consiguiente reducción de la bioactividad, por lo que es más adecuado para áreas de bajo riesgo, como las áreas más frías del norte de Europa. En América del Norte, el TBTO todavía está registrado para carpintería, pero ha sido reemplazado en gran medida por otros productos químicos (Schultz & Nicholas, 2011).

Presenta una variante el TBTN, conocido como naftenato de tributilestaño, que es particularmente efectivo contra los barrenadores marinos, lo que lo hace ideal para su uso en madera expuesta al agua de mar.

5.2.1.2.4.1 SISTEMAS ORGANICOS MODERNOS

Estos preservantes son formulaciones en base acuosa de compuestos orgánicos sintéticos libres de metales, que pueden emplearse aislados o combinados, en mezclas con fungicidas e insecticidas.

01 AAC-W

Es un preservante hidrosoluble que se aplica en tratamientos de vacío presión y también sin presión. Es una mezcla de compuestos de alquil amonio cuaternario (también conocidos como *quats*) en la forma de cloruro de didecil dimetil amonio (DDAC) o bicarbonato/carbonato de didecil dimetil amonio y cloruro de dialquildimetilamonio o bicarbonato/carbonato de dialquildimetilamonio (C8 o C12). En general se utilizan combinaciones de *quats* o en combinación con otros biocidas orgánicos.

El carbonato de didecildimetilamonio es una sustancia activa utilizada para proteger la madera (vigas, tablas, etc.) frente a hongos basidiomicetos que pudren la madera y hongos de pudrición blanda, manchas de albura que decoloran la madera, hongos de manchas azules y moho e insectos que destruyen la madera. Se aplica mediante impregnación en autoclave vacío-presión, inmersión e inmersión en tanque abierto.

02 IPBC

El IPBC, carbamato de 3-yodo-2-propinilbutilo, es un biocida orgánico con baja toxicidad para los mamíferos. Se diluye fácilmente en hidrocarburos y tiene buena eficacia contra hongos de descomposición y mohos. Sin embargo, el IPBC no tiene actividad contra los insectos y con el tiempo, se degrada lentamente en la madera. El IPBC se ha utilizado desde 1975 para tratar madera de carpintería en América del Norte, y para el tratamiento de vigas y vigas laminadas sobre el suelo cuando se combina con un insecticida, pero su uso más común es para la protección contra el moho y las manchas y en general en combinación con otros biocidas. En Europa, el IPBC se combina con otros fungicidas y/o insecticidas para aplicaciones sobre el suelo en áreas de bajo riesgo. En los Estados Unidos está normalizada la combinación de IPBC con hidrorrepelente (IPBC-SB-1) (American Wood Protection Association, 2019) y es utilizado también como principio activo en lasures (Western Wood Preservers Institute, 2023).

El 3-yodo-2-propinilbutilcarbamato (IPBC) se utiliza tanto para el pretratamiento de la madera (por inmersión, rociado, doble vacío, CO2 supercrítico y vacío-presión) por parte de usuarios industriales/profesionales, como para el

tratamiento protector de la madera in situ por inyección en agujeros y en aplicación con brocha, tanto por usuarios profesionales como aficionados

03 Triazoles combinados con otros activos

A veces, PPZ y TEB se combinan para proporcionar una mayor eficacia contra una gama más amplia de hongos. Ninguno de los dos es muy eficaz para prevenir el crecimiento de algunos tipos de hongos de las manchas, y pueden combinarse con un conservante como el 3-yodo-2-propinil carbamato de butilo (IPBC) para mejorar la protección. Su eficacia contra los hongos de pudrición blanda también está menos documentada, pero generalmente no se usan como biocida principal en aplicaciones donde la pudrición blanda es una preocupación.

Los azoles no protegen contra el ataque de insectos en situaciones donde los insectos representan un peligro, pero pueden combinarse con insecticidas como los piretroides.

Combinaciones de triazoles o de triazoles con insecticida son empleados en aplicaciones residenciales

i IPBC/PPZ/TEB-SB-1

Una formulación compuesta de IPBC, PPZ (propiconazol), TEB (tebuconazol) y un producto con propiedades hidrorrepelentes. Está normalizada para su aplicación sin presión con solventes orgánicos en productos de madera. (American Wood Protection Association, 2019)

ii PTI

Un sistema acuoso de tercera generación estandarizado por la AWPB únicamente para aplicaciones sobre el suelo (UC1 a UC3). PTI es un sistema basado en azoles con una mezcla de TEB (tebuconazol) y PPZ (propiconazol) con una cantidad muy pequeña del insecticida imidacloprid. El imidacloprid, un neo-nicotinoide, es extremadamente eficaz para controlar las termitas y otros insectos, incluso en niveles muy bajos. Sin embargo, en condiciones de UC4 y UC5 puede lixiviar en madera húmeda y también puede biodegradarse y, en consecuencia, agotarse. En Europa y Oceanía existe un producto similar pero con un insecticida piretroide sintético como la permetrina.

04 ISOTIAZOLINONAS

Las isotiazolinonas son un grupo de compuestos heterocíclicos que contienen un enlace N-S activado que, al reaccionar con los nucleófilos celulares, le confiere actividad biocida, actividad que puede aumentarse con la presencia de cloro en la molécula. Se encuentran comúnmente en muchos productos de consumo como productos de limpieza, cosméticos y pinturas a base de agua.

Hay cuatro miembros de la familia de las isotiazolinonas que se emplean en preservación de madera: octilisotiazolinona (OIT), diclorooctilisotiazolinona (DCOIT o DCOI), metilisotiazolinona (MIT) y la metilcloroisotiazolinona (CMIT), las dos últimas empleadas en general combinadas para tratamientos de madera a presión. DCOI es la más utilizada para este fin.

i DCOI

El 4,5-dicloro-2-n-octil-4-isotiazolin-3-ona es un preservante oleoso, el más nuevo registrado en lo EE. UU. para tratamientos vacío-presión. El DCOI ha sido estandarizado como conservante de la madera por la AWWPA desde 1989 y los usos en contacto con el suelo se agregaron en 2017.

Según North American Wood Pole Council el sistema de preservación ha sido probado exhaustivamente para postes de servicios públicos y crucetas, demostrando con un gran desempeño produciendo postes duraderos (Preservatives for Wood Utility Poles).

El DCOI tiene una toxicidad moderadamente baja para los mamíferos. Sin embargo, son conocidas las reacciones alérgicas que puede provocar, debiendo evitar manipular la madera tratada con las manos sin protección y también evitar reprocesar la madera recién impregnada.

Es fácilmente soluble en hidrocarburos y muestra una excelente estabilidad y resistencia a la lixiviación en la madera en pruebas a largo plazo en áreas con un riesgo de deterioro alto a severo, tanto en aplicaciones sobre el suelo como en contacto con el suelo (Schultz & Nicholas, 2011), siendo usado exitosamente para postes y crucetas (North American Wood Pole Council, s.f.). Es usado también en conjunción con un hidrorrepelente para aplicaciones residenciales como cercos y decks. Además de la preservación de la madera, el DCOI se utiliza en el tratamiento de aguas, pinturas y revestimientos, adhesivos, membranas de vinilo para techos, suelos de vinilo, tapicería marina y muebles de exterior

Fabricantes: Arxada, Koppers Performance Chemicals, Viance, LLC.

i EL2

Un sistema acuoso de tercera generación basado en la combinación del fungicida DCOI con el insecticida imidacloprid, con amplia actividad contra los hongos de descomposición y las termitas (Schultz & Nicholas, 2011). Según la AWWPA P4-14 la formulación debe incluir también un estabilizador de la humedad (MCS). El sistema de preservación EL2 utiliza tecnología patentada de partículas de polímeros solubles en agua que dispersan y transportan al activo DCOIT a la madera durante el tratamiento (Schultz & Nicholas, 2011).

Ha sido estandarizado por la AWWPA para aplicaciones sobre el suelo (UC1 a UC3). Esto incluye la mayor parte de los productos de madera para exteriores

que se utilizan en la construcción residencial, excepto las aplicaciones en contacto con el suelo.

ii MIT/CMIT

En los sistemas registrados hasta 2020 para el uso en preservación de madera dichas isotiazolinonas se usan combinadas y no por separado. Las concentraciones empleadas en preservación de madera y productos de madera varían entre 13 y 63 ppm para tratamientos a presión, y entre 15 y 54 ppm para tratamientos por spray e inmersión.

02 CIPROCONAZOL/TIAMETOXAM

Otros biocidas orgánicos potenciales incluyen ciproconazol y el insecticida neonicotinoide tiametoxam. Se informa que estos tienen una actividad aún mayor que sus análogos altamente efectivos discutidos anteriormente y ya están disponibles comercialmente y registrados (Schultz & Nicholas, 2011).

03 PXTS

El tetrasulfuro de polixilenol (PXTS) es una mezcla oligomérica de polisulfuros de alquilfenol formado por la reacción del ácido cresílico con cloruro de azufre y azufre, y es activo contra la descomposición, la podredumbre blanda y las termitas.

Ha demostrado alta efectividad y baja lixiviación para situación UC3 y UC 4 con retenciones de 4 y 16 kg/m³ respectivamente (Schultz & Nicholas, 2011)

Fue desarrollado como sustituto de la creosota y tiene baja toxicidad a los mamíferos.

Tiene alta viscosidad y debe ser calentado para impregnar. (Freeman, et al., 2004).

04 CLOROTALONIL

Otro biocida potencial utilizado durante algún tiempo en aplicaciones agroquímicas es el clorotalonil. Tiene una toxicidad extremadamente baja para los mamíferos, una amplia actividad contra hongos de descomposición e insectos y tiene buena estabilidad y resistencia a la lixiviación en la madera. Un importante esfuerzo de investigación en la década de 1990 lo examinó como una alternativa para el PCP. La baja solubilidad del clorotalonil en la mayoría de los solventes orgánicos dificulta la formulación para el tratamiento de preservación a presión de la madera pudiendo acarrear problemas de penetración. Sin embargo, puede ser posible desarrollar una formulación no tradicional, como un sistema de partículas dispersas a base de agua (Schultz & Nicholas, 2011).

El etofenprox o éter 2-(4-etoxifenil)-2-metilpropil 3-fenoxibencílico es un nuevo tipo de insecticida, un piretroide sintético de amplio espectro con baja toxicidad para los mamíferos.

La sustancia activa etofenprox se utiliza en Europa en productos biocidas contra las principales plagas de insectos que destruyen la madera, en particular el escarabajo de cuernos largos (*Hylotrupes bajulus*) y termitas (*Reticulitermes santonensis*).

Los productos que contienen etofenprox están destinados a ser utilizados como preservantes de la madera mediante aplicación preventiva por técnicas industriales, es decir, vacío-presión en maderas de las clases de uso 1 a 3, y por tratamientos de inmersión en las clases de uso 1 y 2.

En la Tabla 6 se esquematiza la efectividad de los principales biocidas mencionados frente a hongos e insectos.

Tabla 6. Especificidad de biocidas frente a hongos y/o insectos. Extraída de (Khademibami & Bobadilha, 2022)

Biocide	Efficacy	
	Fungicide	Insecticide
Boron compounds (boric acid, borax...)	+	+
Carbamates (IPBC...)	+	
Copper inorganic compounds (copper oxide, ...)	+	
Copper naphthenates and citrates	+	
Creosotes	+	+
Isotiazolones (DCOIT)	+	
N-organodiazoniumdioxymetals (Cu-HDO...)	+	(+)
Quaternary ammonium compounds – QAC (DDAC...)	+	(+)
Sulfamides (dichlofluanid, tolylfluanid...)	+	
Triazoles (propiconazole, tebuconazole...)	+	

Modified from Reinprecht (2010). +, basic biocidal activity; (+), additional biocidal activity.

5.2.1.3 ADITIVOS NO BIOCIDAS QUE MEJORAN LA EFICACIA DE LOS BIOCIDAS

La formulación de un preservante contiene agentes que mantengan estable la solución o suspensión (en caso de productos micronizados), reguladores de pH y puede tener otros aditivos que mejoren el desempeño. Otros aditivos que puede ser necesario incorporar son los antiespumantes, que permiten la operativa.

Algunos sistemas comerciales incluyen repelentes de agua, a menudo hidrocarburos de cera que se formulan como una emulsión. Los repelentes de

agua en la madera sobre el suelo, como los decks, reducen el agua absorbida durante la lluvia y, por lo tanto, reducen en gran medida el potencial de descomposición, la lixiviación y pueden mejorar la estabilidad dimensional (Schultz & Nicholas, 2011).

5.2.2 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

El tratamiento térmico es el proceso de modificación de madera con mayor avance a nivel comercial (Hill, 2006). La modificación de madera por medio del aumento de la temperatura ha sido usada en procesos tan antiguos como el reportado por Tiemann (1915) en el cual madera seca al aire se calentaba por 4 horas a 150°C con vapor sobrecalentado, resultando en una reducción en la absorción de humedad, lo que tenía un efecto en la resistencia a la degradación. Hoy en día, se entiende por tratamiento térmico a la aplicación de calor a la madera para lograr mejorar el desempeño del material. Por lo tanto, no se requieren químicos sino únicamente un aumento de la temperatura (Cantera, 2020). Si bien existen diferentes tecnologías actualmente, todas se basan en el mismo principio y tienen como objetivo cambiar algunas propiedades de la madera entre las que se encuentran: la reducción de la higroscopicidad (menor humedad de equilibrio a una determinada humedad relativa) y la mejora en la resistencia al ataque microbiológico. Además, estos cambios, normalmente se acompañan de un empeoramiento de algunas propiedades mecánicas y de una mayor tendencia a la formación de rajaduras y quiebres. En algunos casos, la estabilidad dimensional puede mejorarse con el tratamiento térmico, pero depende mucho de las condiciones empleadas (Hill, 2006).

Por lo tanto, los diferentes procesos que se han desarrollado varían en el tiempo y temperatura empleados, así como la presión, humedad inicial de la madera y el medio de transferencia de calor, particularmente para incidir en las propiedades finales del producto (Militz and Altgen, 2014). La mayoría de los procesos existentes implica la aplicación de temperaturas mayores a 140°C ya que por debajo de este valor los cambios en las propiedades del material son mínimos (Hill, 2006). Temperaturas por encima de 260°C resultan en una degradación inaceptable por lo que existen pocos reportes con tratamientos a tan altas temperaturas. El calentamiento puede hacerse en atmósfera de aire, vapor, vacío o con un gas inerte como nitrógeno. El principal inconveniente del uso de aire es las reacciones de oxidación debido a la presencia de oxígeno, que alteran significativamente las propiedades del producto (Hill, 2006). Existen tecnologías que utilizan aceite (como el de linaza) como medio de transferencia de calor de forma de minimizar reacciones de oxidación.

Los cambios en la estructura química y celular de la madera a través del tratamiento térmico, y que inciden en las propiedades mencionadas anteriormente, han sido extensamente estudiadas por la comunidad científica en las últimas décadas y son muy dependientes de las condiciones de

tratamiento empleadas. Las hemicelulosas tienen una mayor degradabilidad en comparación con la celulosa y la lignina. Al aumentar la temperatura, los grupos acetil se degradan formando ácido acético el cual cataliza la progresiva degradación de las hemicelulosas a monómero y oligómeros produciendo furfural, 5-hidroximetilfurfural (HMF) y formaldehído entre otros compuestos. La degradación de las hemicelulosas tiene efectos tanto en la resistencia microbiológica del material como en su higroscopicidad. Este último aspecto se debe a que los grupos OH de la pared celular están principalmente presentes en las hemicelulosas y son responsables de la absorción de agua que incide por un lado en la inestabilidad dimensional y por otro lado en generar un ambiente más propicio para el ataque microbiológico. La degradación de las hemicelulosas resulta en una reducción de la presencia de grupos OH en la pared celular generando una baja en la humedad de equilibrio. Por otra parte, los productos de degradación formados pueden tener efecto tóxico para los microorganismos generando también un aumento de la resistencia al ataque microbiológico.

Si bien la celulosa, como ya se mencionó, tiene una mayor estabilidad al aumentar la temperatura, existen estudios que demuestran que se producen cambios en su cristalinidad lo que contribuye a la reducción de la presencia de grupos OH disponibles para la absorción de agua, con los efectos que ya se mencionaron. Temperaturas a partir de 120°C ya pueden resultar en una reducción del grado de polimerización, debido a un ataque en las zonas amorfas de la celulosa, mientras que la celulosa cristalina no se ve afectada hasta temperaturas mayores a 300°C (Fengel and Wegener, 1984; Kim et al., 2001) . En este sentido, la presencia de agua en la atmósfera de tratamiento protege a la celulosa de la degradación, probablemente por la capacidad de la celulosa amorfa de adoptar formas más termoestables al absorber agua. Esto implica que atmósferas de vapor permiten tratamientos con temperaturas más altas (Fengel and Wegener, 1984).

Mientras que la lignina sufre cambios considerablemente menores al someter la madera a tratamientos térmicos, los extractivos son los componentes de la madera que rápidamente se volatilizan o degradan durante el tratamiento. Sin embargo, dependiendo del medio de calentamiento empleado y las condiciones del tratamiento, los productos de degradación de hemicelulosas formados pueden resultar en un aumento del contenido de extractivos en el producto final.

La modificación térmica de madera genera cambios significativos en sus propiedades físicas como la higroscopicidad, estabilidad dimensional, color, olor así como en algunas propiedades mecánicas (Tabla 7). La pérdida de masa es el parámetro más indicativo de la severidad del tratamiento ya que se correlaciona directamente con los cambios en las propiedades de la madera (Cantera, 2020) . Una pérdida de masa de hasta un 20% es esperable dependiendo el tipo de proceso empleado (Sandberg, Kutnar and Mantanis,

2017) . Todos los tratamientos térmicos reducen la higroscopicidad de la madera, debido principalmente a una pérdida de polímeros higroscópicos como las hemicelulosas que resultan en una menor humedad de equilibrio del material. Sin embargo, la modificación térmica también resulta en un deterioro de las propiedades mecánicas de la madera, que dan lugar a un material más frágil y quebradizo que puede verse en formación de rajaduras (Calonego, Severo and Ballarin, 2012; Calonego, Severo and Latorraca, 2014; Sandberg, Kutnar and Mantanis, 2017; Cantera, 2020) . En todos los casos, el tratamiento térmico incide en los módulos de ruptura y elasticidad, así como en la dureza del material.

En las últimas décadas, ha habido mucha investigación relacionada a la disminución de los efectos negativos en las propiedades mecánicas mediante la variación en las condiciones de tratamiento, como la atmósfera utilizada o la temperatura (Hill, 2006; Esteves et al., 2007; Calonego, Severo and Latorraca, 2014; Militz and Altgen, 2014; Sandberg, Kutnar and Mantanis, 2017; Jones and Sandberg, 2020) . .

Tabla 7. Cambios principales que ocurren en la madera térmicamente tratada (Sandberg, Kutnar and Mantanis, 2017)

Cambios en propiedades deseadas	Cambios en propiedades no deseadas
Menor humedad de equilibrio	Menor módulo de ruptura (MOR) y menor módulo de elasticidad (MOE)
Mayor estabilidad dimensional	Menor resistencia a impacto
Mayor resistencia al deterioro	Mayor fragilidad
Menor conductividad térmica	Menor dureza
Menor densidad	
Cambio de color	
Olor característico	
Mayor tiempo de prensa en encolado	

El principal objetivo de aumentar la durabilidad de la madera a través del tratamiento térmico se logra gracias a los cambios que se producen en la estructura y propiedades de la madera: por un lado, la reducción de la higroscopicidad y la menor humedad de equilibrio reducen la actividad de agua que repercute en menor capacidad de ataque de los hongos. Por otra parte, algunos compuestos de degradación como el furfural o el ácido acético que permanecen en la madera luego del tratamiento, tienen efectos biocidas. Además, los cambios en los polímeros estructurales pueden hacer que los microorganismos no reconozcan a la madera como potencial fuente de alimento. Por último, la degradación de hemicelulosas puede volver a la madera térmicamente tratada no degradable particularmente para los hongos de pudrición blanca (Cantera et al., 2022).

5.2.3 MODIFICACIÓN QUÍMICA

Hill (2006) define a la modificación química como la acción de agentes químicos, físicos y biológicos que producen mejoras en las propiedades de la madera modificada durante su vida útil. La modificación química implica el uso de productos químicos aplicados a la madera, que según el concepto general desarrollado por Hill (2006) si bien los reactivos usados pueden no ser ambientalmente amigables, el producto final, la madera modificada, debe ser no tóxica en condiciones de servicio y al final de su vida útil, ya sea al disponerse o reciclarse.

Existen dos tipos de modificación química de la madera; la modificación activa en la que ocurren cambios en la naturaleza química del material y la modificación pasiva, en la cual las propiedades cambian sin alterar la química del material. Los métodos de **modificación activa** involucran la reacción química de un reactivo con los grupos hidroxilos de los polímeros de la pared celular (celulosa, hemicelulosa o lignina), para formar un enlace covalente estable entre el reactivo y el polímero (Rowell, 1983). Los grupos hidroxilos son sitios reactivos que juegan un rol fundamental en la interacción madera-agua, por lo cual estos tratamientos disminuyen su disponibilidad en la pared celular, lo que mejora en la estabilidad dimensional de la madera. Por otro lado, la **modificación pasiva** involucra llenado del lumen y/o de la pared celular con reactivos, sin una reacción con los componentes de la madera (Sandberg et al, 2021).

En general, los procesos de modificación química mejoran propiedades como la estabilidad dimensional y la durabilidad de la madera sin pérdidas significativas de las propiedades mecánicas, lo que permite en algunos procesos como la acetilación, emplear la madera modificada en usos estructurales.

Estos tratamientos son visualizados internacionalmente en forma muy positiva, por los resultados obtenidos y especialmente desde el punto de vista ambiental. Sin embargo, la implementación de estas tecnologías de modificación química de la madera, tienen limitantes a nivel industrial ya que requieren de la formación de redes comerciales nuevas dentro de las estructuras industriales existentes, a la vez que se deben crear compañías nuevas especializadas en modificación química (Mai 2020). Considerando las tres componentes imprescindibles que deben existir para llevar adelante estos procesos: la disponibilidad de productos químicos (nacionales, importados, la capacidad de las plantas de producirlos, etc.), el “*know how*” de la tecnología a aplicar, y las características y número de plantas de impregnación disponibles, se ha observado en diferentes países, que al fallar uno de los componentes, se detiene la producción. Por ello, procesos técnicamente eficientes a nivel laboratorio y piloto, no cuentan con plantas industriales para producirlos y comercializarlos. A lo largo del informe se presentan varios ejemplos.

5.2.3.1 PROCESOS DE MODIFICACIÓN QUÍMICA DE MADERA

5.2.3.1.1 ACETILACIÓN

La acetilación, es un proceso de modificación química en el cual el anhídrido acético (reactivo electrofílico) es forzado por aplicación de una presión externa a migrar a través de las punteaduras de la madera, para reaccionar con los grupos hidroxilos accesibles (nucleófilos), difundir y continuar reaccionando en lo profundo de la pared celular (Rowell, 1983). Comercialmente se usa *Pinus radiata* como materia prima para este proceso, debido a su baja densidad y la estructura de poros abiertos. Sin embargo, como las fibras en tableros acetilados, reaccionan más fácilmente que la madera sólida sería favorable el uso de otras especies madereras de menor porosidad. El aumento de volumen de la pared celular y la pérdida de grupos OH hidrofílicos, reduce la absorción de humedad, lo que mejora la estabilidad dimensional y la resistencia a la degradación biótica. La madera acetilada se usa en aberturas exteriores, ventanas, contraventanas, persianas, decks, revestimientos y diferentes aplicaciones de la construcción civil.

5.2.3.1.2 FURFURILACIÓN

La furfurilación es un proceso que inicia con la impregnación de la madera en autoclave por vacío -presión - vacío con una emulsión acuosa de la resina que contiene el alcohol furfurílico (o sus derivados pre poliméricos), en presencia de una suave catálisis ácida y un buffer. la siguiente etapa es un curado por calor (durante el cual se debe controlar estrictamente la formación de volátiles), el secado de la madera (que reduce las emisiones) y el reciclado de los productos químicos empleados.

El proceso se ha realizado con numerosas especies madereras, pero las más usadas son pino radiata y pino silvestre. La permeabilidad del pino radiata permite obtener un producto homogéneo, altamente impregnado y denso, con baja absorción de humedad, cuya estabilidad aumenta con el aumento de alcohol furfurílico. Kebony es la principal marca comercial de este producto. También se utiliza alcohol furfurílico prepolimerizado con los mismos aditivos que usa Kebony (comercializado como BioRez) que desarrolló *TransFurans Chemicals* en Bélgica. El producto que da a lugar este proceso fue denominado KeyWood, pero dejó de comercializarse por ser de menor calidad que la madera furfurilada de Kebony (Sargent et al., 2017).

La madera furfurilada adquiere una tonalidad marrón, que expuesta a la radiación se torna gris. La furfurilación incrementa la densidad de la madera tratada que pasa de 480 kg/m³ en pino radiata a 670 kg/m³ luego de furufurilar. Esta madera adsorbe menos humedad en exteriores, debido a su alta estabilidad dimensional. Además, presenta una gran dureza, elasticidad y módulo de ruptura, pero tiene menor resistencia al impacto.

5.2.3.1.3 DMDHEU

DMDHEU (1,3-dimetilol-4,5-dihidroxietilen urea), es un producto químico muy estudiado en Europa, que se emplea para modificar principalmente la celulosa y en condiciones adecuadas a las hemicelulosas, formando enlaces cruzados dentro de la pared de la madera. Para reducir la emisión de formaldehído, se emplea el DMDHEU metilado: DMeDHEU, que a corto plazo mejora la estabilidad dimensional del producto, pero a largo plazo la empeora, ya que lixivia.

Comercialmente se emplea *Pinus radiata* de Nueva Zelanda, debido a la asociación con *TimTechChem International Ltd*, pero también se han empleado a menor escala muchas otras especies de permeabilidad adecuada.

El proceso de modificación consiste en la impregnación en autoclave de la madera seca con DMDHEU, con un ciclo de 1 hora de vacío y 2 horas de presión a 1,2 MPa y el posterior curado y secado de la madera. Son muy importantes las condiciones de curado, para evitar la aparición de fracturas y fendas y tener una baja emisión de formaldehído. Es recomendado el empleo de vapor sobrecalentado para el curado y el secado, por la rápida transferencia de calor que permite, ya que el secado en seco conduce a una mala distribución del DMDHEU en la madera, una baja polimerización de este.

La modificación química con DMDHEU es una tecnología ambientalmente amigable, que mejora la estabilidad dimensional, la dureza superficial y la resistencia a hongos descomponedores y perforadores marinos. Al mismo tiempo reduce la contaminación por hongos manchadores, pero no la elimina, y mejora la resistencia al intemperismo (Emmerich et al, 2019). También disminuye el ataque por termitas respecto a la madera no modificada (Militz et al, 2011). Las propiedades mecánicas como la resistencia al impacto y la integridad estructural disminuyen con mayores ganancias de masa de la madera modificada. Sin embargo, mayores contenidos de DMDHEU incremental la densidad y la dureza.

5.2.3.1.4 SILICATOS Y SILANOS

Los silicatos y silanos son muy utilizado en la modificación de madera. La impregnación (vacío-presión-vacío) con silicatos solubles, de sodio o potasio, una vez fijado a la madera, crean un producto gris-plata resistente al fuego, el agua y los hongos descomponedores.

Como estos productos no resultaron estables a la intemperie, se introdujo una modificación al proceso; se los trató con una emulsión orgánica de silano, que fija el silicato a la madera y produce hidrorrepelencia en la superficie. Se emplea en fachadas y muebles de jardín.

El proceso que sumaba a la impregnación un calentamiento a 200 °C, patentado y desarrollado luego por Stora Enso, se discontinuó por obtener un producto que no tenía las propiedades esperadas (Slimak et al, 2000).

Se comercializa madera tratada con geles basados en tetraetoxisilanos (TEOS), producida mediante un proceso patentado (Bottcher et al., 2000).

También se comercializan maderas con tratamientos superficiales que emplean los silicatos.

5.2.3.1.5 RESINAS FENÓLICAS O RESORCINOL

Resinas fenólicas o resorcinol de relativamente bajo peso molecular y baja viscosidad, son usadas para modificar madera. Una vez impregnada la madera con estas resinas, llenan los lúmenes celulares y reaccionan con ellas mismas o condensan en fragmentos más termoestables. Hincham la pared celular y forman puentes químicos (metileno) entre los sitios reactivos (carbonos aromáticos activados) en la lignina y los grupos metilol de la resina. Si en la etapa de curado la temperatura mayor es acompañada por la aplicación de presión, se obtiene un material con mayor densidad (proceso denominado Compreg).

Sus productos tienen una reducida absorción de humedad, buena estabilidad dimensional, y durabilidad, además de una buena resistencia a la flexión y dureza.

Madera modificada por este proceso posteriormente comprimida o densificada, es utilizada en chapas para material, placas de desgaste en maquinaria, y componentes estructurales en edificaciones.

Cuando además de las resinas fenólicas se usan melamínicas o basadas en urea, y la madera luego de impregnada, se cura en condiciones de acidez o alcalinidad suaves incorporando monómeros como metilmetacrilato o estireno, se tiene otro tipo de madera modificada (proceso denominado Impreg). Este proceso no se ha implementado industrialmente a gran escala debido a los costos de los productos como el metilmetacrilato y el estireno. Se utiliza en productos laminados y pisos.

5.3.1 ESTADO DEL ARTE DE LA PRESERVACIÓN QUÍMICA

EL TAMAÑO DEL SECTOR

La protección de la madera es una necesidad global, pero la mayoría de la madera tratada se utiliza en climas templados, especialmente en América del Norte, el mayor participante del mercado global de madera tratada. Las regiones tropicales en desarrollo, que más necesitan protección para la madera, a menudo carecen de acceso a estas tecnologías debido a los altos costos de tratamiento. De la misma forma el acceso a las nuevas tecnologías de protección predomina en los países con mayor nivel de desarrollo económico. (Morrell, 2019)

El estudio de mercado de (Markets and Markets, 2020). estimaba que el tamaño del mercado de preservantes de madera en 1.700 millones de dólares en 2025 con un crecimiento de 5,1 % entre 2020 y 2025.

En un estudio posterior (Grand View Research, 2023) reportaba un tamaño del mercado en 2023 de 1,56 billones USD con un crecimiento anual compuesto de 5% entre 2024 y 2030, alcanzando un volumen de 2,11 billones USD en 2030.

Basándose en el método de aplicación el mercado se clasifica en tratamiento a presión y sin presión. En 2023 el tratamiento a presión consumía el 60% del mercado y se proyecta crecimiento hasta 2032 (Grand View Research, 2023).

A medida que los consumidores buscan alternativas duraderas y estéticamente agradables a los materiales tradicionales, se prevé que el uso de madera tratada en estos sectores siga expandiéndose, impulsando aún más el crecimiento del mercado. Además, el auge de la economía circular y las prácticas forestales sostenibles está transformando el mercado, con un enfoque en maximizar la eficiencia de los recursos, minimizar los residuos y promover la gestión responsable de los recursos forestales.

De acuerdo a este estudio cinco regiones lideran el mercado de la preservación de la madera:

- Norte América (Estados Unidos, Canadá y México)
- Europa (Alemania, Reino Unido, Francia, Italia, Rusia y Turquía entre otros)
- Asia-Pacífico (China, Japón, Corea, India, Australia, Indonesia, Tailandia, Filipinas, Malasia and Vietnam)
- Sudamérica (Brasil, Argentina, Colombia etc.)

- Medio oriente y África (Arabia Saudita, UAE, Egipto, Nigeria and Sudáfrica)

América del Norte dominaba el mercado, representando en 2023 un 35,6% del mercado de preservantes de madera. Esto se explica por más de 919,000 construcciones en los Estados Unidos en el primer cuarto de 2023 y una pujante industria de la construcción en Canadá generando importante demanda de madera preservada (Grand View Research, 2023).

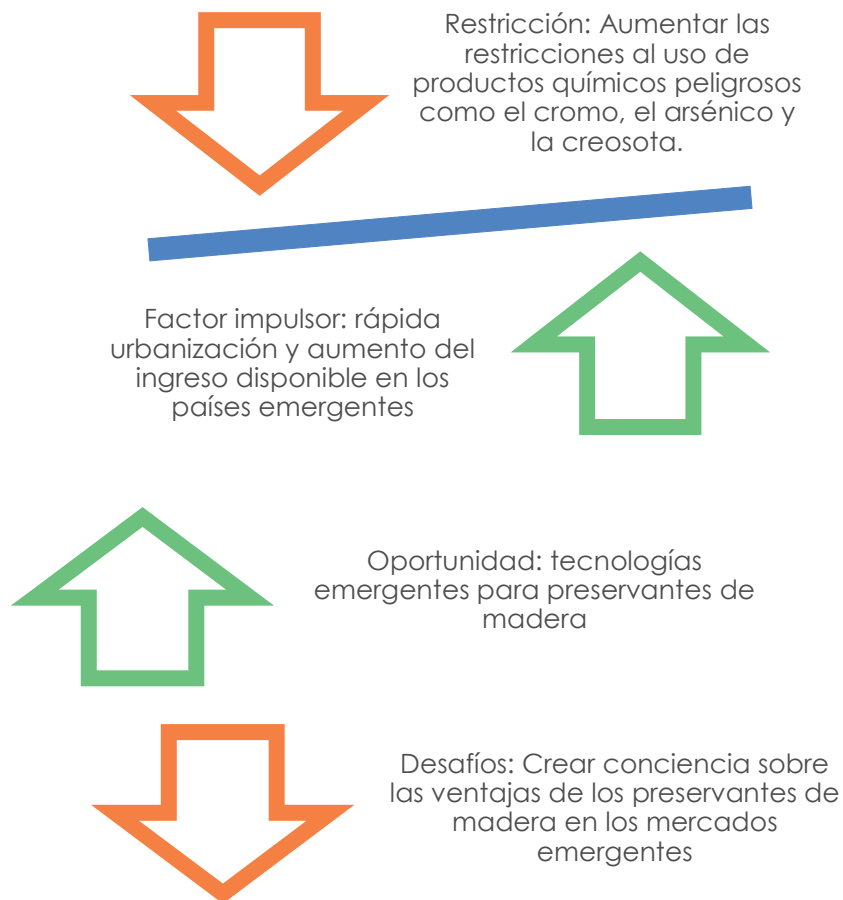
Países africanos y asiáticos tienen aún gran potencial de crecimiento en su demanda de preservantes, pero necesitan aún una mayor concientización de los beneficios de preservar la madera.

Asia Pacífico es un gran mercado potencial para estos productos debido al rápido desarrollo de la industria de la construcción en países como China, India, Japón y Corea del Sur. Según un informe publicado por Oxford Economics en mayo de 2023, se prevé que la industria de la construcción en India experimente el crecimiento más rápido del mundo para 2030. Se proyecta que añadirá 1 billón de dólares al crecimiento de la industria mundial de la construcción para 2030. Las políticas favorables del gobierno de India para fortalecer la infraestructura urbana y satisfacer las demandas de la creciente población en proceso de urbanización están contribuyendo al crecimiento de la industria de la construcción en el país. Por lo tanto, el rápido crecimiento de las actividades de construcción a nivel mundial se considera el principal factor impulsor del mercado de productos.

EMPRESAS CLAVE

Los mayores fabricantes de preservantes identificados entre diferentes estudios son: BASF, Wolman GmbH, Koppers Inc , LANXESS AG, Troy Corporation, Borax Inc., KMG Chemicals Inc., Remmers AG, Kurt Obermeier GmbH & Co. kg, Kop-Coat Inc., Lonza Group Ltd (actualmente denominado como Arxada y anteriormente como Arch Chemicals, Jubilant, Dolphin Bay, Rio Tinto, Viance, Nisus Corporation, BERKEM, , Impru Wood Protection Ltd, Wykamol Group Ltd, Lonza Specialty Ingredients

FACTORES CLAVE PARA LA EVOLUCION DEL MERCADO



IMPULSORES DEL CRECIMIENTO

El estudio de Markets and Markets (2020) destacaba como impulsores al desarrollo de la industria de la construcción y de infraestructura.

Grand View Research (2024) explicaba el 65,8 % del mercado en 2023 por el consumo del segmento de aplicaciones residenciales dominando el mercado (Figura 4Figura 1). En aplicaciones residenciales, el producto se utiliza en puertas, escaleras, techos, armarios, columnas y vigas. Otra tendencia significativa es la creciente demanda de madera tratada para aplicaciones exteriores como terrazas, cercas y paisajismo.

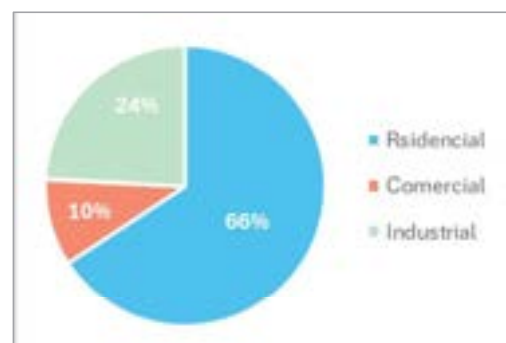


Figura 4. Rubros de aplicación de los preservantes en el mundo. Fuente: (Grand View Research, 2023)

El desplazamiento de la población de zonas rurales a urbanas a nivel mundial impulsa aún más la demanda de construcción, lo que a su vez incrementa el consumo de madera y de este producto. Según el Gobierno de la India, aproximadamente 600 millones de personas vivirán en zonas urbanas en 2030, lo que generará una demanda de aproximadamente 25 millones de viviendas adicionales. Este es uno de los factores impulsores y una oportunidad para el mercado de productos en el país.

Se espera que la creciente demanda de proyectos residenciales en países como China, India, Japón, EE. UU. y el Reino Unido impulse aún más la demanda del producto en dichos países. La industria de la construcción comercial está incrementando el uso de la madera, en particular la madera maciza, para diversas aplicaciones debido a su sostenibilidad, atractivo estético y competitividad en costos. La construcción con madera maciza es una alternativa energéticamente eficiente para edificios comerciales y de gran altura, con una huella de carbono menor que la del acero o el concreto.

Además, la construcción tradicional con estructura de madera también se considera una opción rentable para centros comerciales, restaurantes y grandes superficies comerciales. Este producto desempeña un papel crucial en la construcción comercial, ya que ayuda a proteger la madera de la degradación.

Otra fuente de demanda para madera preservada es la construcción industrial, grandes estructuras como, almacenes, plantas de fabricación y centros de distribución. Asimismo, los soportes de madera se utilizan como estructura temporal para envíos internacionales y para soportar objetos pesados. Además, se utiliza en ménsulas y pilotes. El creciente sector industrial a nivel mundial está incrementando la demanda de madera, lo que se espera que impulse aún más el consumo global del producto.

LOS PRESERVANTES Y SU TENDENCIA

De acuerdo a las predicciones de (Markets and Markets, 2020), en 2019 los preservantes acuosos alcanzaban un 75,6% del mercado global y según (Grand View Research, 2023) al 2030 seguirán dominando el mercado (Grand View Research, 2023)

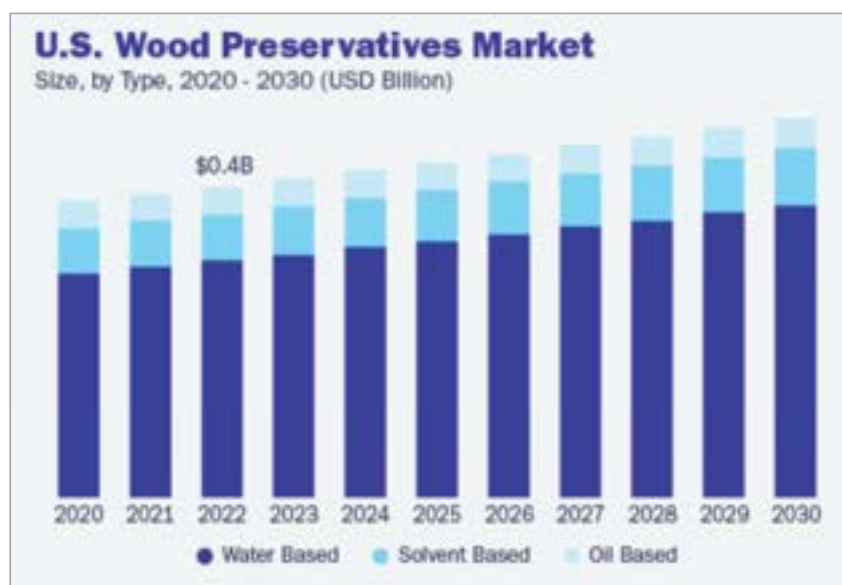


Figura 5. Tendencia cualitativa del mercado de preservantes por tipo: acuosos, orgánicos y oleosos. Fuente: (Grand View Research, 2023)

La preservación de la madera ha empleado tradicionalmente sustancias químicas que se consideran tóxicas y pueden afectar negativamente a la salud humana y al medio ambiente. En función del impacto de las sustancias químicas en el medio ambiente y la salud humana, se han establecido restricciones a los preservantes, comenzando desde los Estados Unidos y los países europeos y extendiéndose a otras partes del mundo. Por esta razón, nuevos preservantes han sido in se están realizando serios esfuerzos a nivel mundial para desarrollar preservantes de menor toxicidad han sido introducidos al mercado mientras productos alternativos basados en productos naturales con baja o nula toxicidad. Debido a ciertas limitaciones que incluyen diferentes resultados de las evaluaciones de laboratorio y de campo de los productos naturales, dificultades para llegar a un acuerdo unificado a nivel mundial sobre normas que definan la calidad del desempeño de los productos naturales y la eficacia de estos compuestos naturales cuando se exponen a las condiciones ambientales, el progreso de las nuevas tecnologías ha sido lento (Khademibami & Bobadilha, 2022).

Teniendo en cuenta las dificultades para el desarrollo de preservantes con costos competitivos para usos exigidos, especialmente para las regiones con climas más severos,, es de esperar que para estas condiciones continúen utilizándose preservantes de las primera y segunda generación (Khademibami & Bobadilha, 2022).

Según (Khademibami & Bobadilha, 2022), históricamente, los preservantes de madera incluían principalmente creosota, pentaclorofenol (PCP) y acuosos conteniendo arsénico. Los sistemas de conservación de primera generación más comunes son los siguientes: arseniato de cobre cromado (CCA), creosota, PCP, arseniato de cobre y zinc amoniacal (ACZA).

En 2003, tres sistemas no arsenicales ya disponibles comercialmente podían reemplazar al CCA en aplicaciones residenciales: amonio cuaternario alcalino de cobre alcalino (ACQ), azoles de cobre (CA) y bis-(N-ciclohexildiazéniodioxi) de cobre (Cu-HDO). Se pueden encontrar excelentes análisis técnicos de los sistemas conservantes más nuevos y sus propiedades y aplicaciones en la literatura (Freeman, et al., 2003).

Los fabricantes mundiales de preservantes de madera como Koppers, BASF Wolman GmbH, Borax, KMG Chemicals, Kop Coat y Arxada (Khademibami & Bobadilha, 2022) así como Troy y Janssen Pharmaceutica (Grand View Research, 2023) realizan esfuerzos continuos para desarrollar nuevos productos químicos como el ACQ, boratos, azoles de cobre, naftenato de cobre, Cobre-HDO, betaína polimérica y azoles de cobre micronizado que cumplan con las normas y regulaciones de las agencias ambientales.

Se espera que los precios de los extractos de madera en 2023 y los próximos años aumenten debido a su creciente demanda

La elección del tratamiento se realiza en función del uso definido por asociaciones o agencias reconocidas internamente, como la Asociación Estadounidense de Protección de la Madera (AWPA) o las Normas Europeas para Uso Estructural (EN 335) (Reinprecht, 2016).

5.3.1.1 ESTADOS UNIDOS Y CANADÁ

En América del Norte, los preservantes de madera históricamente más utilizados industrialmente han sido la creosota, el PCP y sistemas a base de metales pesados. Aunque ha habido desafíos sobre el uso continuo de estos químicos, basándose en un uso seguro y con impactos ambientales mínimos. La Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA) y la Agencia de Regulación de Plaguicidas de Canadá han revisado estos químicos, permitiendo hasta el momento su uso en aplicaciones industriales, aunque pueden estar restringidos a usos específicos. De acuerdo al North American Wood Pole Council, los preservantes de postes de electrificación utilizados en EE. UU. son el PCP, la creosota, el CCA, el naftenato de cobre el DCOI y el ACZA (North American Wood Pole Council, s.f.).

El Pentaclorofenol (PCP) es muy usado para usos exigido como postes de servicios públicos y prohibido para uso doméstico y en contacto con seres humanos (Morrell, 2019). Sin embargo, desde febrero 2022 ya no puede producirse, los solicitantes registrados pueden continuar produciendo, vendiendo y distribuyendo preservantes de madera que contengan PCP mientras las instalaciones de tratamiento de madera realizan la transición de PCP a alternativas, con plazo hasta el 28 de febrero de 2027 (United States Environmental Agency, 2024).

El naftenato de cobre se ha usado como preservante desde 1940, pero a partir de 1980 su interés aumenta como sustituto del PCP (Khademibami & Bobadilha, 2022). Su uso está aumentando para traviesas de puentes, traviesas y postes de servicios públicos. Además de las aplicaciones estructurales, tiene aplicaciones domésticas.

Hoy en día, la mayoría de los ferrocarriles de Clase 1 y muchos de línea corta en América del Norte, incluidos Norfolk Southern, CSX, Union Pacific, Canadian Pacific, Canadian National, Genesee & Wyoming y otros, están utilizando CuN como una alternativa a la creosota para los tratamientos de traviesas o vigas de puentes. Más del 33% de las vigas de los puentes y aproximadamente el 5% de las traviesas se tratan actualmente con CuN (en aceite conforme a las especificaciones de la norma AWP A HSA o la norma AWP A HSH). El naftenato de cobre es la principal alternativa al arseniato de cobre cromado y al pentaclorofenol para la protección a largo plazo de los postes de servicios públicos. El Western Wood Preservers' Institute informó recientemente que en la actualidad se utilizan entre 130 y 150 millones de postes de madera en América del Norte. Aproximadamente 5 millones se reemplazan cada año, de los cuales aproximadamente el 3% se tratan con CuN. Entre las empresas de servicios públicos de América del Norte que compran cantidades significativas de postes de madera tratados con CuN se encuentran Seattle City Light, Snohomish PUD, Sacramento Municipal Utility District, Springfield Utility y LCRA Services, entre otras (Koch & Manning, 2021).

Las isotiazolinonas son usadas exitosamente para aplicaciones estructurales como los postes, mientras que el Cu HDO es apenas usado en los EE. UU. y el PXTS no es usado por razones económicas (Jeff Morrell, comunicación personal, setiembre 2024). A modo de ejemplo según el Public Service of New Mexico, el DCOI es el candidato a remplazar al PCP para postes de electrificación en Nuevo México y Texas (Sedillo, 2023).

En el mercado residencial, el arseniato de cobre cromatado (CCA) dominó hasta que fue retirado en 2004, abriéndose una oportunidad para nuevas alternativas como el amonio cuaternario alcalino de cobre (ACQ) y el azol de cobre alcalino (CA-C, CA-B), que son considerados más amigables con el medio ambiente al no contener arsénico ni cromo hexavalente, aunque presentan preocupaciones sobre lixiviación de los metales del producto tratado. Los sistemas micronizados, que utilizan suspensiones de cobre finamente molido (sustituyendo al cobre en solución), han cobrado popularidad, aunque no son adecuados para especies de madera más difíciles de impregnar (Morrell, 2019). Según Morrell (comunicación personal, setiembre 2024), el MCA es actualmente el producto más popular para uso residencial en los Estados Unidos. Existen

También se han desarrollado alternativas sin metales, combinando triazoles, carbamatos y compuestos de amonio cuaternario, pero su uso es limitado en contacto directo con el suelo. Estos nuevos sistemas requieren métodos más

sofisticados para evaluar la penetración y retención, a diferencia de los sistemas a base de cobre más simples de detectar a simple vista.

El quinolato de cobre (Cu-8) es usado actualmente por dos plantas para productos compuestos de madera como los tableros contrachapados, impregnando con un solvente orgánico que no causa hinchamiento (Morrell, comunicación personal, setiembre 2024)

Los boratos son usados ampliamente en la costa oeste y Hawái, en general para estructuras, en particular para soleras inferiores.

Al mismo tiempo, en el mercado norteamericano han surgido sistemas alternativos, entre ellos varios extractos de madera, silanos y una serie de otros sistemas que afirman proporcionar protección no biocida, aún sin evidencia suficiente de desempeño satisfactorio (Morrell, 2019).

Los repelentes de agua se utilizan en muchos de los sistemas sobre el suelo de segunda y tercera generación (Schultz & Nicholas, 2011).

5.3.1.2 EUROPA

En Europa, la preservación de la madera está altamente desarrollada, respaldada por un marco regulatorio estricto y normativas establecidas por organizaciones como el EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) y la EUROPEAN WOOD PRESERVATIVE ASSOCIATION (EWPA). Estas regulaciones se alinean con directivas de la Unión Europea, como REACH (Registration, Evaluation, Authorization, and Restriction of Chemicals), que controlan el uso de sustancias químicas para minimizar los riesgos para la salud humana y el medio ambiente.

La serie EN 350 regula la durabilidad natural de la madera, mientras que la norma EN 15228:2009 detalla los productos y tratamientos químicos permitidos para madera estructural. Además, existe un énfasis creciente en el desarrollo y adopción de tratamientos menos tóxicos, como formulaciones a base de agua que contienen compuestos como boratos, cobre soluble o azoles, diseñados para ser más sostenibles y seguros.

La situación en Europa difiere de otras regiones debido a varios factores:

1. **Menor riesgo de biodeterioro:** Muchas zonas del continente tienen condiciones climáticas que presentan menos amenazas biológicas comparadas con los trópicos. Esto genera una tendencia a bajar las exigencias de protección química por parte de estos países, en contradicción con otras regiones con mayor índice de deterioro por hongos o con termitas.
2. **Mayor disposición al pago:** Los consumidores europeos están dispuestos a invertir más en productos de madera sostenible y de alta calidad, fomentando la innovación en preservantes.

3. **Sostenibilidad:** Las políticas ambientales han llevado al desarrollo de productos con menor impacto ecológico, aunque en algunos casos estos tratamientos pueden tener una vida útil esperada más corta. Esto refleja una tendencia en los usuarios a retirar productos de madera más por razones estéticas que por ataques biológicos.

Sin embargo, los tratamientos con vida útil reducida también presentan retos, como costos operativos más altos y un impacto ambiental indirecto debido a su reemplazo frecuente. Por ello, existe una necesidad de desarrollar métodos mejorados para prevenir la degradación física de las superficies de madera en exposiciones exteriores (Morrell, 2019).

Productos aceptados en la norma EN 15228:2009 (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009) para madera estructural:

A.2 Productos protectores

a) Formulaciones acuosas basadas en aminos o cobre soluble (II) que incluyan opcionalmente un borato o un componente orgánico complementario en forma de:

- azoles;
- compuestos de amonio cuaternario:
- cloruro de benzil-C12-16 alquil dimetil amonio;
- cloruro de didecil dimetil amonio;
- borato de didecil polioxietil amonio;
- propionato de didecil polioxietil amonio;
- cloruro de trimetil alquil amonio;
- Cobre (II)-Bis-(N-ciclohexil diaceniodioxi) (CU-HDO);

b) Formulaciones acuosas a base de cobre-cromo que incluyan opcionalmente un borato o un fosfato.

c) Formulaciones acuosas de amonio cuaternario que incluyan opcionalmente IPCB, boratos, azoles, fenpropimorf (fungicida sistémico) e insecticidas orgánicos.

d) Formulaciones acuosas de azol que incluyan opcionalmente IPBC, boratos, azoles, fenpropimorf e insecticidas orgánicos.

e) Formulaciones acuosas de boratos de N-Didecil-N dipolietoxiamonio (betaína polimérica) o boratos de didecilpolietoxiamonio que incluyan opcionalmente un insecticida orgánico.

f) Formulaciones acuosas de boratos.

g) Formulaciones acuosas de boratos y formulaciones acuosas de fosfatos y guanilurea.

h) Formulaciones orgánicas.

i) Creosota.

En relación al tratamiento superficial, las dificultades de procesamiento en los sitios de construcción debido a la exposición a las condiciones exteriores han dado lugar a la demanda de productos de tratamiento de superficies

altamente procesados. Por otra parte, los productos a base de agua son mucho más duraderos, resistentes y flexibles que los antiguos productos a base de disolventes, siendo los materiales de tratamiento de superficies más utilizados en la actualidad en Europa

En los países nórdicos en particular las normas NTR tienen un listado de productos aceptados para preservación de madera (Salminen, et al., 2014), que se listan en la Tabla 8

Tabla 8. Lista de preservantes de madera aceptados por la NTR y sus ingredientes activos (Salminen, et al., 2014)

Producto preservante (nombre comercial)	Ingrediente activo
Celcure P50 Fluid	cobre, cromo, fósforo
Impralit CK	cobre, cromo
Celcure AC 500	cobre, boro, cloruro de N-alquilbencil-dimetilamonio
Celcure AC 800	cobre, cloruro de N-alquilbencil-dimetilamonio
Impralit BKD	boro, betaína polimérica
Impralit KDS 4	cobre, betaína polimérica, boro
Kemwood ACQ 1900	cobre, cloruro de N-alquilbencil-dimetilamonio
Kemwood ACQ 2200	cobre, boro, cloruro de N-alquilbencil-dimetilamonio
Sinesto B	cloruro de N-alquiltrimetilamonio, boro
Tanalith E-7	cobre, boro, tebuconazol, propiconazol
Wolmanit CX-8	cobre, cobre-HDO, boro
Wolmanit CX-8 WB	cobre, cobre-HDO
Wolmanit CX-10	cobre, cobre-HDO, boro
Wolsit KD-10	Propiconazol
Gori 605	propiconazol, tebuconazol, IPBC
Protim P-vac 11	Propiconazol
Vft-Creosote oil M	derivado del alquitrán de hulla
Creosote oil	derivado del alquitrán de hulla
Wood Protection Type C	derivado del alquitrán de hulla

En los países nórdicos existen otras tecnologías emergentes para la preservación química de la madera que no se producen comercialmente. Actualmente demasiado caras y/o ineficientes y aún se encuentran en la etapa de investigación. Salminen et al. (2014) citan algunos ejemplos:

- Los sistemas basados en zinc se han estudiado desde 2004. El zinc tiene un bajo costo y se puede formular en forma incolora. Tiene una larga historia como estabilizador de rayos UV y componente conservante en recubrimientos. Sin embargo, el bajo uso de este sistema se debe a su menor eficiencia en comparación con los productos que contienen COV y a los altos costos de registro de nuevos conservantes de madera.
- Los sistemas basados en aluminio, hierro y circonio se describen en la literatura y están patentados, pero actualmente no se conocen aplicaciones comerciales.
- Los sistemas de protección natural incluyen alcaloides vegetales extraídos del árbol de Neem, ácido salicílico y vinagre de madera, así como metabolitos y quistes bacterianos

La demanda y las oportunidades de métodos de preservación de la madera más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, y por lo tanto el volumen de producción, aumentarán en el futuro. Esto también aumenta la demanda de diferentes certificados sobre el impacto ambiental y la evaluación de la huella de carbono de los productos de madera.

Además, el aumento de los problemas de moho, los cambios en los valores de los rayos ultravioleta y la humedad relativa del aire en Finlandia debido al cambio climático hacen que el tratamiento de superficies sea más importante que nunca

5.3.1.3 ASIA

5.3.1.3.1 CHINA

La primera planta de tratamiento se estableció por primera vez en 1911 para producir durmientes (Chen, 2010 en (Cao, et al., Jan, 2012)). Recientemente, se ha producido un cambio en el uso de la madera tratada, desde aplicaciones industriales, como traviesas de ferrocarril, pilotes y vigas de madera, hacia usos más residenciales, como paisajismo, puentes para parques y cubiertas. Esto ha alterado notablemente las características de la industria, pero también ha impulsado un rápido crecimiento. Se estima que en 2002 había 70 plantas de preservación de madera en funcionamiento, en comparación con más de 340 en 2008 (Cao, et al., Jan, 2012). En el año 2004 en China se preservaba anualmente entre 0,55 y 0,65 millones de m³ de madera, en cerca de 120 plantas de tratamiento (Jiang, 2004).

Estimaciones sugieren más de 600 empresas en 2011, aunque muchas son pequeñas operaciones (20 000 m³/año).

El rápido crecimiento de la industria china de la madera tratada ha generado una enorme demanda de madera tratada y sin tratar importada, así como de productos químicos (Preston y Jin, 2008). Al mismo tiempo, este crecimiento ha generado cierto caos en el mercado que podría obstaculizar la demanda futura de importaciones.

Al 2004 el CCA (Cobre-Cromo-Arsénico) era el preservante principal, utilizado en amplio espectro de aplicaciones, para tratar diversos productos como cercas, terrazas, postes, componentes hortícolas, postes agrícolas, etc. No obstante desde el 2001 estaba siendo sustituido gradualmente por el ACQ (cobre - amonio cuaternario). Con estos productos se impregna madera de bambú, abeto, pinos, eucaliptos y cáñamo. El uso de Cu Az (azol de cobre) era reciente en esa época en pequeña escala.

En 2004 se estimaba que alrededor de 10,000 m³ de madera son tratados anualmente con ACQ y azoles de cobre.

La creosota era principalmente utilizada para tratar traviesas de ferrocarril y postes de electricidad, su uso ha disminuido debido a la competencia del cemento, que ahora es más económico.

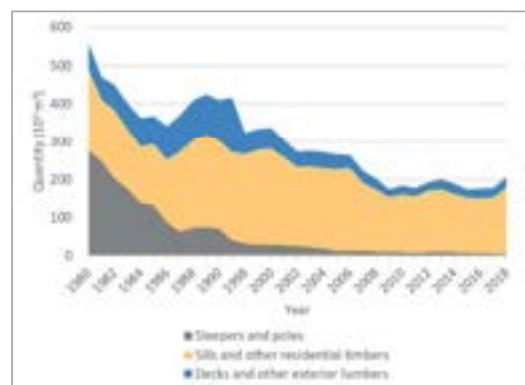
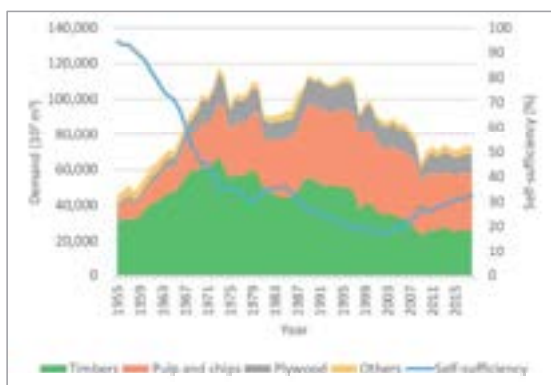
En 2011, la gran mayoría de la madera se trató con CCA, y algunos tratadores utilizaron compuestos cuaternarios de cobre alcalino (ACQ). La mayoría de los tratadores preferían el CCA debido a su menor costo, mientras que el ACQ se utilizaba a menudo en proyectos gubernamentales donde el precio era menos crítico.

En 2011, en el sur de China, preservantes a base de boro eran utilizados para tratar madera de caucho, aproximadamente entre 0.1 y 0.2 millones de m³ anualmente para madera de uso interior. Se combinaba también en formulaciones con fungicidas como oxina de cobre y clorotalonil, Benomyl, y carbendazim. Estos últimos productos eran utilizados para controlar hongos de mancha y mohos como sustituto del pantotenato de sodio (Cao, et al., Jan, 2012). En 2011 al menos una planta aplicaba preservantes sin metales que contenían compuestos de triazol. Además, muchos ofrecían madera carbonizada (principalmente abeto Douglas).

Se detectó un fuerte interés en desarrollar nuevos preservantes para el mercado chino, y el gobierno ha apoyado activamente la investigación con este objetivo. El desarrollo de preservantes suele ser un esfuerzo a largo plazo, y no está claro si este apoyo se traducirá en productos reales.

Se espera que la Asociación China de la Industria de Protección de la Madera, establecida oficialmente en octubre de 2011, asuma numerosas responsabilidades de mediación, como el desarrollo y la aplicación de estándares de calidad y la mejora de la comunicación entre empresas, para impulsar un crecimiento más sostenible de la industria (W. Dang, comunicación personal, 16 de octubre de 2011).

Según una consulta realizada la mayoría de los impregnadores afirmaron aplicar los estándares de la Asociación Americana de Protección de la Madera (AWPA); sin embargo, no se detectó evidencia del equipamiento requerido para el control de calidad. Algunas plantas indicaron que enviaban



periódicamente soluciones a laboratorios externos para su análisis construcción (Cao, et al., Jan, 2012).

Algunas empresas chinas adoptaron la norma ISO/FDIS 21887:2007 para establecer clases de riesgo diferentes a las normas AWP, lo que podría generar confusión en el mercado. El Centro de Desarrollo de la Conservación de la Madera de China desarrolló un marco nacional de normas industriales basado en normas AWP, normas europeas y normas japonesas con cinco categorías: normas básicas y universales, normas de gestión, normas de producto, normas metodológicas y normas para la madera tratada en aplicaciones de construcción (Cao, et al., Jan, 2012).

A pesar del desarrollo de normas, su aplicación sigue siendo deficiente. Los tratadores expresaron la necesidad de estándares de calidad para evitar que la madera tratada se gane una mala reputación. La percepción del pino del sur tratado de Estados Unidos como superior pone de relieve la necesidad de una autoridad clara que supervise el uso de la madera tratada en China. En última instancia, el mercado exigirá normas uniformes adaptadas al contexto chino (Cao, et al., Jan, 2012)

5.3.1.3.2 JAPÓN

La producción forestal japonesa ha aumentado de forma tal que en 2018 los bosques ocupaban aproximadamente el 70% de la superficie terrestre de Japón, siendo más del 40% de todos los bosques. La mitad de la demanda de troncos se destina a la fabricación de madera aserrada; la otra mitad, a pulpa y astillas, madera contrachapada y otros productos. En 2018, la demanda de madera rolliza para uso industrial (excluyendo combustible) fue de 73.184.000 m³, y la tasa de autosuficiencia doméstica aumentó a aproximadamente el 30%. Alrededor del 70% de la madera se utiliza para la construcción, especialmente para uso residencial (Figura 6) (Osawa, et al., 2020)

Figura 6. Demanda y usos de madera rolliza en Japón (basado en Statistics of Agriculture, Forestry and Fisheries, Japan). Fuente: (Osawa, et al., 2020)

Figura 7. Usos de madera preservada en Japón (basado en reporte anual de JWPIA, Japan Wood Preservers Industry Association. Fuente: (Osawa, et al., 2020)

Según Yamamoto et al. (2019) en (Osawa, et al., 2020), en consonancia con la estabilidad del mercado de uso residencial, el mercado de productos de madera tratada se ha desplazado del uso industrial al residencial. A finales de la década de 1990, la mayor demanda de productos de madera tratada se centró en los alféizares de las viviendas, desde postes de servicios públicos hasta traviesas (Figura 7)

Aproximadamente el 75 % de la madera tratada se ha utilizado en la construcción de viviendas (solera inferior y otros materiales). Por lo tanto, la producción total anual de madera tratada está estrechamente relacionada con el número total de viviendas construidas en Japón (Japan Wood Protection Association, s.f.). Ya en 2018, (Osawa, et al., 2020) relatan que los alféizares de las viviendas representaban alrededor del 85 % de los productos de madera tratada en Japón. En el futuro, se espera que los productos de madera tratada se expandan a otros mercados exteriores, como las cubiertas de madera, cuya participación actual ronda el 10%.

Preservantes utilizados en Japón

El CCA comenzó a dejar de utilizarse a finales de la década de 1990. Debido a la enmienda de la ley de prevención de la contaminación del agua de 1997, muchas empresas abandonaron el CCA. En su lugar, cambiaron preservantes acuosos a base de cobre (quat y ACQ) y conservantes acuosos sin cobre (BAAC, AAC) (Figura 8)

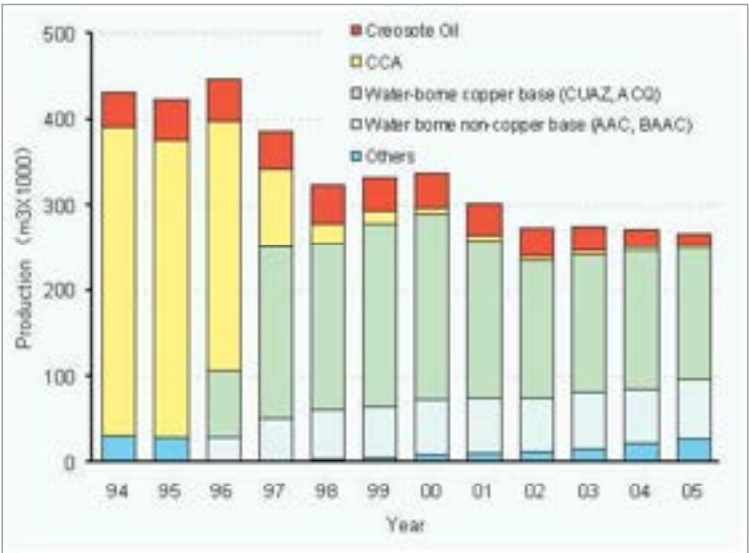


Figura 8. Producción de madera preservada de 1994 a 2005. Fuente: (Japan Wood Protection Association, s.f.).

La mayoría de los materiales de construcción se trataban con preservantes a base de agua (a base de cobre [CUAZ, ACQ] y sin cobre [BAAC, AAC]). Para uso en exteriores, se utilizaban preservantes a base de agua, con cobre y sin cobre, además de aceite de creosota. Casi todos los durmientes se trataron con aceite de creosota.

La

Los preservantes aceptados y registrados por las normas japonesas al 2004 se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Preservantes de madera registrados por JIS K 1570 (2004) para tratamiento a presión. Fuente JWPIA (Japan Wood Protection Association, s.f.).

Categoría	Tipos	Abreviación
Acuosos	Compuesto de alquil amonio cuaternarios (quat)	No.1 AAC-1
		No.2 AAC-2

	Amonio cuaternario alcalino de cobre	NO.1 ACQ-1 NO.2 ACQ-2
	Azoles de cobre	No.1 CUAZ-1 No.2 CUAZ-2 No.3 CUAZ-3
	Amonio cuaternario alcalino de boro	BAAC
	Quat + piretroide sin grupo éster ⁶	SAAC
	Azol Quat + piretroide sin grupo éster	AZAAC
Tipo emulsión	Jabón metálico de ácido graso	NO.1 NCU-E NO.2 NZN-E NO.3 VZN-E
		No.1 NCU-O No.2 NZN-O
		AZN
Oleosolubles	Jabón metálico de ácido nafténico	A
	Azol+ Compuesto neonicotinoide	
Oleosos	Creosota	

ESTÁNDARES DE DURABILIDAD EN JAPÓN

Las clases de durabilidad más reconocidos en Japón son las categorías K1 a K5 (cuanto mayor sea el número, mayor durabilidad), especificadas en las Normas Agrícolas Japonesas (JAS 2019) para madera tratada (Tabla 10) La Tabla 11 muestra la correspondencia entre las clases de uso y las JAS examinadas en 2006 por Suzuki (2006) . En Japón, dado que no se elaboran listas de productos correspondientes a las clases de uso, los arquitectos y constructores deben elegir ellos mismos las condiciones de servicio y los materiales. Se carece de métodos de ensayo de campo para el uso sobre el suelo correspondiente a la clase de uso 3. Solo los resultados de los ensayos con estacas enterradas han evaluado la durabilidad de la madera y de la madera preservada. Los resultados de los ensayos de campo sobre el suelo deberían ampliarse para evaluar la durabilidad de los productos de madera de forma más adecuada (Osawa, et al., 2020)

Tabla 10. Preservantes típicos y retenciones especificadas en las normas JAS. Fuente: (Osawa, et al., 2020)

Preservante	B	AAC	ACQ	CUAZ	A
Ingredientes activos	H ₃ BO ₃	DDAC	CuO, BKC	CuO, Azol	Creosota
Clases de desempeño	K1*	1,2	-	-	-
	K2	-	2,3	1,3	0,5
	K3	-	4,5	2,6	1
	K4	-	9	5,2	2
	K5	-	-	10,5	-

Tabla 11. Correspondencia entre clases de uso y JAS. Adaptado de (Osawa, et al., 2020)

Clases de uso (2007)	Condiciones de servicio	Razones para elevar clase	JAS**
A	Interior seco		K1

⁶ Un ejemplo de este tipo de piretroide es el Etofenprox

1B			
2A	Interior húmedo		
2B			
3.1A	Exterior sobre el suelo protegido del clima exterior	Interior húmedo +10 años de uso	
3.1B			
3.2A	Exterior sobre el suelo no protegido del clima exterior	Interior húmedo +2-3 generación (50-60 años o 75-90 años)	K2
3.2B			K3
4,1	En contacto con suelo	Sin protección exterior +larga vida útil	K4
4,2	En contacto con suelo, severo, agua fresca	En contacto con suelo +larga vida útil	K5
5	Marino		

* : Clasificación según to ISO 21887:2007.

** : Clasificación de categorías desempeño según JAS 1083:2019

La Asociación Japonesa de la Protección de la Madera (JWPA) fue fundada en 1974. Evalúa el desempeño de los preservantes y la madera tratada, desarrolla tecnologías y aplicaciones de tratamiento, y se esfuerza por garantizar la seguridad de los operadores y usuarios, así como del medio ambiente. Además, la JWPA busca introducir nuevos preservantes de madera y desarrollar materiales a base de madera de alta durabilidad (Japan Wood Protection Association, s.f.).

5.3.1.4 OCEANÍA

5.3.1.4.1 AUSTRALIA

Sales de boro: el boro proporciona una protección eficaz contra el ataque de los insectos perforadores. Se ha utilizado en Australia durante más de 40 años para proteger la albura de las maderas duras susceptibles contra los barrenadores líctidos o "polvorientos".

El tratamiento consiste en remojar madera recién aserrada sin curar en soluciones de sales de boro. Las sales se difunden por la madera y, después del tratamiento, se deja secar. Los tratamientos con boro son habituales en la madera en la que se requiere una clasificación de la apariencia

Existen varias formulaciones diferentes de **CCA** que se utilizan comúnmente en la industria maderera australiana.

ACQ, CA y CU-HDO están aprobados y son utilizados en Australia. Asimismo **sales de boro, cobre y biocida poliméricos**

LOSP (conservante orgánico ligero a base de disolvente) utiliza un disolvente orgánico ligero para absorber los productos químicos conservantes en la

madera. Se extrae en las últimas etapas del tratamiento, dejando atrás el conservante.

La mayoría de los LOSP contienen **fungicidas, insecticidas y cera** para dar a la superficie propiedades repelentes al agua.

La madera tratada con LOSP es adecuada para pintar con sistemas acrílicos o a base de aceite, y es más eficaz como tratamiento cuando está sellada. No es adecuada para uso en el suelo. La madera tratada con LOSP no cambia de apariencia. Esto la convierte en un tratamiento adecuado para aplicaciones de apariencia o calidad.

Se aplican principalmente en fábrica utilizando un sistema de presión y vacío, pero hay soluciones disponibles para pintar como parte de un programa de mantenimiento (Australian Government. Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, s.f.)

Algunos principios activos autorizados por el Gobierno Australiano son :

- Permetrina
- Deltametrina⁷
- Cipermetrina
- Fenitrotión⁸
- TBTO
- Fenvalerato⁹
- Clorfenapir¹⁰
- Bifentrina

5.3.1.4.2 NUEVA ZELANDA

Debido a la gran impregnabilidad del *Pinus radiata* en NZ se han desarrollado muchos preservantes. Sin embargo, no todos están autorizados para la construcción (ALTANER, 2022). A continuación, se listan los productos aprobados por la norma NZS 3640:2003 (NZTPC, 2025)

CCA en forma de óxidos
CCA en forma de sales
Boro
TBTO

⁷ Piretroide sintético con actividad insecticida y acaricida de amplio espectro (<https://es.wikipedia.org/wiki/Deltametrina>)

⁸ insecticida organofosforado y acaricida no sistémico (<https://es.wikipedia.org/wiki/Fenitroti%C3%B3n>)

⁹ Insecticida piretroide sintético que actúa por contacto (<https://en.wikipedia.org/wiki/Fenvalerate>)

¹⁰ Pro-insecticida (entra en actividad luego de ser metabolizado por el insecto) de la familia de los pirroles halogenados (<https://en.wikipedia.org/wiki/Chlorfenapyr>)

Naftenato de cobre
Azoles de cobre
TBTN
IPBC
Propiconazol + Tebuconazol
Triadimefon + ciproconazol + bifentrina
Permetrina
Azoles de cobre micronizados (como dispersión)
Cobre alcalino de amonio cuaternario micronizado (como dispersión)
Cobre alcalino de amonio cuaternario

CCA es el más común en Nueva Zelanda, especialmente en aplicaciones estructurales como postes y madera para exteriores. Este tratamiento se considera efectivo y seguro por las autoridades locales, aunque con recomendaciones para minimizar riesgos en áreas públicas. Otros tratamientos como los de boro y azoles son también comunes, particularmente en aplicaciones que requieren menor resistencia a la intemperie

Los procesos de tratamiento varían de un conservante a otro. Se utilizan tratamientos a presión para CCA, ACQ y CuAz, que son a base de agua. Los tratamientos de menor presión se utilizan para los conservantes a base de disolventes (LOSP) TBTN, TBTO, propiconazol + tebuconazol, IPBC y naftenato de cobre. También se utilizan procesos de menor presión para nuevas formulaciones de boro. Otras nuevas formulaciones de boro se aplican mediante pulverización o inmersión. La difusión bórica tradicional implica un proceso de inmersión.

El tratamiento LOSP de la madera implica la impregnación de preservante en la madera mediante procesos de vacío controlados de tal manera que se garantice no haya derrames ni se ponga en riesgo al personal. La madera puede recibir tratamiento LOSP según las siguientes clases de riesgo especificadas en las normas nacionales:

- H1.1 y H1.2 para estructuras de madera
- H2 (solo Australia) para estructuras de madera
- H3.1 para uso en exteriores sin contacto con el suelo donde no hay posibilidad de que quede agua atrapada, como fascias y tablas de intemperie.
- H3.2 (solo CuN, consulte NZS 3640 para conocer las especificaciones de retención) para uso en exteriores sin contacto con el suelo pero con riesgo de atrapamiento de agua, como vigas y terrazas.

5.3.1.5 LATINOAMÉRICA

5.3.1.5.1 BRASIL

Según (Vidal, et al., 2015) la preservación de la madera en Brasil comenzó a aplicarse a finales del siglo XIX, principalmente para atender la gran demanda de durmientes para ferrocarriles. Solo en la década de 1960, la preservación de la madera ganó mercado con el aumento de la investigación científica, la elaboración de normas técnicas y la construcción de plantas industriales para la preservación de la madera. En 2011, el eucalipto y el pino fueron las principales especies utilizadas en plantas de preservación de madera adoptando el proceso de vacío-presión. En la producción a pequeña escala, se aplicaba el proceso de difusión. El arseniato cromatado de cobre (CCA) y el borato de cobre y cromo (CCB) fueron los preservantes más utilizados, con cierta utilización de creosota. (Borges, et al., 2018) mencionan que algunos preservantes orgánicos como el PCP están prohibidos en Brasil. La producción de madera tratada se concentra en postes para cercas, postes y traviesas.

Actualmente están registrados en IBAMA (Instituto Brasileiro do MeioAmbiente e dos Recursos Naturais, 2024) los siguientes productos:

Aplicación en autoclave:	
Tebuconazol e Cobre	Fungicida e Insecticida
Cobre micronizado, Tebuconazol e Propiconazol	Insecticida e Fungicida
CCA	Fungicida e Insecticida
CCB	Fungicida e insecticida
Aceite Creosoto	Fungicida e insecticida
Otras formas de aplicación	
Ciflutrina ¹¹	Insecticida, termiticidas
Cipermetrina	Insecticida
Cipermetrina e IPBC	Fungicida e Insecticida
Deltametrina	Insecticida
IPBC	Fungicida
Tanino	Fungicida
Tribromofenol ¹²	Fungicida

Las otras formas de aplicación refieren a tratamientos por inmersión, cepillado, adición de cola sobre paneles, difusión, en definitiva, tratamientos no industriales

¹¹ Insecticida piretroide sintético (<https://es.wikipedia.org/wiki/Ciflutrina>)

¹² Fungicida derivado de del fenol utilizado como antimancha

e incluso algunos de uso directo por el consumidor, como algunos termiticidas y acabados protectores tipo lásur¹³ (cortesía de Flavio Geraldo)

Como tendencia, la preservación de la madera debe alcanzar nuevos mercados, como la construcción de edificios, los embalajes de madera y las crucetas, así como intensificar los usos tradicionales. Según Vidal et al (2015), si bien existen numerosas investigaciones sobre productos químicos para la conservación de la madera, el CCA debe mantenerse a lo largo de los años, ya que los productos alternativos no presentan la misma eficacia ni efectos claros sobre la salud humana y el medio ambiente.

En Brasil existe el ABPM que actúa como foro nacional del sector de madera preservada, representando al segmento ante los órganos reguladores y los Poderes Legislativo y Ejecutivo. Entre sus miembros se incluyen plantas de conservación de madera, industrias químicas, universidades y empresas que utilizan madera tratada.

Entre sus objetivos están:

- Interactuar con institutos nacionales e internacionales de enseñanza e investigación para monitorear productos y procesos innovadores;
- Unir a las empresas que componen el sector para fortalecer el segmento;
- Defender los derechos, intereses y prerrogativas de sus miembros;
- Promover el progreso de las técnicas de preservación de la madera;
- Contribuir a la elaboración y revisión de las normas técnicas que afecten al segmento;
- Establecer programas de control de calidad con aserraderos y fabricantes de preservantes;
- Colaborar y fomentar una mejor implementación de la legislación aplicable al sector y sus agentes;
- Difundir conocimientos.

5.3.1.5.2 URUGUAY

En Uruguay el sector de la preservación es una industria poco innovadora que impregna mayormente con CCA-C, producto importado directamente por las empresas o comprado a distribuidores regionales. No existen fábricas de preservantes. Algunas pocas empresas están comenzando a sustituir el CCA-C por otros productos más amigables con el ambiente, como el MCA-C o algún derivado de boro.

La madera preservada en Uruguay proviene de plantaciones nacionales de *Pinus* spp. (pino) y *Eucalyptus* spp. (eucalipto). El pino corresponde a las especies *Pinus taeda* y *Pinus elliotii*, mientras que las especies de eucalipto consumidas por este sector son

¹³ recubrimiento de acción impregnante que deja un acabado “a poro abierto” y que no crea capa de modo que permite “respirar” a la madera, intercambiar humedad con el aire.

principalmente *Eucalyptus grandis* con alguna participación de *E. maidenii*, *E. globulus* y *E. viminalis* (DGF, MGAP, 2020).

Según a la Encuesta de Plantas de Impregnación realizada por la Dirección General Forestal (MGAP_DGF_2020), en 2019 existían 12 plantas impregnadoras cuya producción de tablas fue de 8108 m³, a un 98 % al género *Pinus*, específicamente *Pinus taeda* y *Pinus elliottii*.

En 2022 se realizó un relevamiento de plantas de impregnación potenciales abastecedoras de la industria de la construcción, en el marco del proyecto "Lineamientos estructurales para viviendas de maderas de pino y eucalipto" financiado por FONPLATA a través de IICA y ejecutado por la Comisión Honoraria de la Madera (PROYECTO OCT/NR-URU-56/22)¹⁴. Este relevamiento excluyó la planta de tratamiento perteneciente a la compañía nacional de energía eléctrica, UTE, que produce postes de eucalipto y crucetas de pino tratados con CCA-C para las líneas de distribución eléctrica con una capacidad de procesar 30.000 postes de madera por año y 10.000 crucetas (Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE), 2019).

Según lo relevado estas plantas de impregnación consumieron 71.936 m³ de madera, correspondiendo 30.141 m³ a pino (42%) y 41.795 m³ a eucalipto con un volumen total efectivamente impregnado fue 60.207 m³.

En esa instancia se pudo comprobar que la mayor parte del sector continuaba trabajando con CCA-C (arseniato de cobre cromatado), existiendo una planta (Ecotrimma, <https://ecotrimma.com/>) que impregnaba con amonio cuaternario y carbonato de cobre (similar ACQ) y otra (Barraca de Maderas Don José, <https://barracadonjose.com.uy/>) con borato de sodio y zinc. Asimismo, se detectó una planta industrial que abandonó el CCA-C y estaba en pleno proceso de transición a sales de boro (Tiland, <https://tiland.uy/>). Esta planta no estaba produciendo, sino que está poniendo a punto sus procesos. En 2024 la planta Oxipal (<https://oxipal.com/>) incorporó una línea de impregnación con MCA-C (de Arxada). Asimismo, existen proveedores en el mercado intentando promover la introducción de nuevos preservantes a base de cobre y orgánicos sin cobre (Frogquim, frogquim@gmail.com).

En Uruguay, existen entidades asociativas de la industria de la madera ADIMAU, SPF, CIPROMA, pero no existe ninguna gremial que agrupe a los industriales de la Preservación de la Madera. Esto es una limitante para el desarrollo del sector en forma colectiva y colaborativa.

Tampoco existen normas técnicas vinculadas a la temática. Si bien los impregnadores relatan aplicar mayormente las normas AWWA, pocas empresas constan de capacidades para realizar un efectivo control de proceso; muchas recurren a contratación de servicios analíticos externos.

En relación a las actividades de I+D+i existen líneas de investigación data en instituciones como Latitud-Fundación LATU (www.latitud.org.uy) quien en 2017 asume el rol de ejecutar I+D+i y continuar las acciones del LATU (www.latu.org.uy) y en el CENUR Noreste

¹⁴ <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/noticias/lineamientos-estructurales-para-viviendas-maderas-pino-eucalipto>

de Udelar (<https://www.tacuarembu.udelar.edu.uy>) y Facultad de Química de Udelar (<https://www.fq.edu.uy/>).

Dichas actividades están vinculadas al grupo internacional de investigación en protección de madera, IRG-WP (<http://www.ircg-wp.com/>).

Se espera que un desarrollo del sector en relación a la innovación de los productos empleados y al control de producción esté asociado a:

- Desarrollo de la industria de la construcción con madera a nivel nacional e internacional
- Posibilidad de inserción internacional de madera preservada
- Restricciones ambientales del mercado exterior
- Nuevas reglamentaciones que podrían surgir desde el Ministerio de Ambiente.
- Acciones de difusión y promoción por parte de organizaciones como el Centro Tecnológico Forestal Madera.

5.3.1.5.3 ARGENTINA

Las características de la industria argentina son similares a la de Uruguay. Las primeras plantas operaron con pentaclorofenol y creosota, hasta 1995 que se prohibió el uso del pentaclorofenol. Actualmente solo se comercializa madera tratada con creosota y CCA. Se espera incorporar al mercado madera impregnada con productos en base a cobre micronizado, como el MCA, pero aún se encuentra en etapa de registro.

5.3.1.5.4 CHILE

La mayor parte de las plantas de impregnación chilenas, trabajan con CCA, y la madera tratada con CCA es la que domina los mercados. Sin embargo, han comenzado a incorporarse en menor proporción, plantas que trabajan con ACQ y MCA, que en general se destinan a la construcción de viviendas, debido a que, por reglamentos nacionales, la madera estructural debe estar impregnada, por ser de *Pinus radiata*, que presenta baja durabilidad natural frente a hongos e insectos.

5.3.1.6 PERSPECTIVAS DE LA PRESERVACIÓN QUÍMICA

La industria de la preservación de la madera tiene muchos desafíos por delante.

Menor impacto ambiental

La presión social y ambiental por reducir la utilización de químicos está ampliamente instalada. Al mismo tiempo, existe una creciente preocupación pública sobre la posibilidad de migración de preservantes al medio ambiente circundante. Prácticamente todos los preservantes utilizados actualmente tienen cierto grado de solubilidad en agua impactando directamente en los

organismos acuáticos. Además, estas moléculas tienden a tener un efecto mucho mayor en los entornos acuáticos porque los organismos no objetivo están literalmente bañados por la sustancia química. Las preocupaciones sobre la migración de conservantes han llevado a algunos organismos reguladores a restringir severamente el uso de madera tratada en algunas aplicaciones.

Otro factor que afecta al uso de la madera tratada es la disposición final. Las normas sobre eliminación varían ampliamente en todo el mundo. En los EE. UU., la primera recomendación para la madera tratada que ha llegado al final de su vida útil es reutilizarla en una aplicación similar. Por ejemplo, un poste de servicios públicos puede convertirse en una barrera de estacionamiento o una traviesa de ferrocarril puede convertirse en madera para paisajismo. Llegará sin embargo un momento en que la madera ya no será útil en ninguna aplicación. En la mayor parte de América del Norte, la madera tratada se puede desechar en instalaciones de desechos sólidos municipales revestidas (vertederos) siempre que cumpla ciertos criterios. Prácticamente toda la madera tratada con preservantes a base de aceite cumple estos requisitos y existe una exención para los sistemas a base de agua como el CCA. La mayor parte de la madera tratada industrial se regala, se reutiliza o se entierra en vertederos, mientras que la mayor parte de la madera tratada residencial parece colocarse en vertederos.

Según (Morrell, 2019), a pesar de la falta de un incentivo importante para evitar el vertido, están surgiendo algunas opciones. La madera tratada con materiales a base de aceite contiene casi un 20 % en peso de petróleo y representa una valiosa fuente de energía. Los productos con presencia de PCP tienen requisitos de permiso de combustión más restrictivos. Otro problema relacionado con la eliminación es la presencia de madera tratada con metales pesados en los flujos de desechos destinados a la combustión. El último obstáculo para desarrollar métodos alternativos para reciclar la madera tratada es el costo de recolectar un material ampliamente disperso con diferentes grados de tratamiento. Dados los costos actuales de recolección, el vertido parece la opción más viable para muchos materiales en América del Norte; situación que se repite muchos otros países. Sin embargo la eliminación representa un problema clave que persiste entre los usuarios de madera.

Reducir el deslavado del producto

Reducir el riesgo de lixiviación y migración de preservantes se ha convertido en una preocupación importante en algunas regiones, en particular donde se utiliza madera tratada en las proximidades de zonas ribereñas. Si bien no hay duda de que parte del producto químico migrará de la madera tratada, el objetivo es garantizar que los niveles se mantengan por debajo de los capaces de inducir un efecto ambiental negativo. Se han desarrollado modelos que utilizan tasas de migración para un volumen dado de madera tratada junto con información sobre condiciones específicas de las vías fluviales, como el pH o la

velocidad de la corriente de agua, para predecir las liberaciones totales a lo largo del tiempo. Estas predicciones se pueden comparar luego con los niveles de efectos mínimos conocidos para varios organismos. Al mismo tiempo, se han modificado las prácticas de tratamiento para reducir el riesgo de sobretratamiento, eliminar los depósitos superficiales de productos químicos, reducir el riesgo de sangrado en el servicio y, siempre que sea posible, garantizar que los conservantes se hayan inmovilizado o hayan reaccionado con la madera. Estas mejores prácticas de gestión son obligatorias en muchas localidades de América del Norte, pero aún es necesario realizar investigaciones para mejorar estas prácticas y confirmar su rendimiento a lo largo del tiempo.

Se han realizado estudios relacionados a la fijación del boro en la madera con los siguientes aditivos citados por Reinprecht (2016):

- Ácidos coloidales de silicona (Yamaguchi, 2001);
- Cloruro de calcio, sulfato de zinc o acetato de plomo, en cuya presencia se producen boratos metálicos menos solubles en agua $M(BO_2)_2$ ($M = Ca, Zn, Pb$); los boratos de zinc también se aplican en la protección de compuestos de madera (Kirkpatrick y Barnes, 2006).
- Proteínas animales que producen estructuras de gel con boro al aumentar la temperatura (Thevenon y Pizzi, 2003),
- Taninos (Pizzi y Baecker, 1996; Tondi et al., 2012);
- Monoglicéridos, que crean complejos estables con iones borato (Mohareb et al., 2010).
- Sistema glicerol/glioxal (Toussaint-Dauvergne et al., 2000)

Nuevos productos

El desafío y el área de interés más obvio es encontrar nuevos principios activos que tengan una actividad única o que sean más rentables o que de alguna manera sean más competitivos con los preservantes de madera que se comercializan actualmente. La cantidad reducida de nuevos ingredientes activos que se introducen en el sector agrícola da una indicación de que esta vía no es tan prometedora como en el pasado.

Pocos nuevos productos químicos han entrado en los principales mercados en los últimos años. Una excepción ha sido el cobre micronizado, que domina el mercado residencial en el este de los EE. UU.. Este sistema, sin embargo, sigue dependiendo de metales pesados y podría ser visto como una modificación más que como un desarrollo completamente nuevo.

Como en cualquier industria, las tecnologías relacionadas con la madera tratada con preservantes deben seguir avanzando o se sustituirán por materiales

alternativos. Hay varias oportunidades que involucran nuevas sustancias químicas, métodos de tratamiento, tratamientos no biocidas y revestimientos. La falta de un conjunto de tratamientos alternativos fácilmente disponibles sugiere la necesidad de un mayor desarrollo de nuevos productos químicos y podría ser una oportunidad para la empresa que pueda crear el sistema ideal.

El proceso de desarrollo de un nuevo preservante de la madera puede variar desde tan solo 5 a 10 años o más. Esto incluye el desarrollo de datos toxicológicos y de desempeño. En general, no es económico desarrollar una sustancia química únicamente para la protección de la madera. Muchos pesticidas agrícolas se han adaptado para su uso en la madera, como lo demuestra el uso de triazoles y los amonios cuaternarios para la protección de la madera. Esta clase de sustancias químicas tiene muchas otras aplicaciones en la agricultura y el cuidado personal y estas otras aplicaciones permiten que los costos de desarrollo se distribuyan entre muchos mercados (Morrell, 2019).

Probablemente, el mayor esfuerzo se está llevando a cabo para explorar el desarrollo de nuevos productos y sistemas de tratamiento con los ingredientes activos disponibles. La expectativa es identificar una combinación sinérgica donde el nivel de actividad observada sea mayor que la suma de la actividad individual de sus componentes. Estas sinergias son patentables y pueden hacer una contribución significativa a una posición competitiva en el mercado (Helmer & Leithoff, 2008).

Productos naturales

La otra área que sigue recibiendo interés de la investigación es el potencial de utilizar de productos naturales para la protección de la madera, como ser extractos de duramen, extractos de plantas, aceites esenciales, ceras, resinas y taninos de corteza, quitosano, etc. Los agentes antimicrobianos producidos por las plantas (aromáticos y no aromáticos) incluyen fenoles, terpenoides, alcaloides, lectinas y polipéptidos y se pueden utilizar en diferentes aplicaciones (Khademibami & Bobadilha, 2022)

Los investigadores han buscado durante mucho tiempo utilizar extractos de duramen como posibles preservantes de la madera; sin embargo, el enfoque tiene dos problemas. Los extractos extraídos de especies de madera muy duraderas rara vez son tan eficaces cuando se introducen en especies menos duraderas. Un problema más importante es que muchas especies naturalmente durables ya son escasas, lo que hace que sea difícil justificar el corte de más madera para la producción de preservantes naturales. La extracción de subproductos como el aserrín puede ser posible pero puede producir rendimientos menores.

Una alternativa al uso de extractos de duramen podría ser el uso de extractos foliares o materiales de otros organismos. Muchas plantas han evolucionado para producir follaje que contiene una serie de compuestos diseñados para

desalentar el ataque de bacterias, hongos o insectos. El follaje puede ser una fuente especialmente atractiva de compuestos biológicamente activos porque se puede cosechar repetidamente sin cortar el árbol o, alternativamente, se puede recolectar al mismo tiempo que se cosecha el árbol para obtener madera. Varios estudios recientes sugieren que los extractos de follaje exhibieron actividad contra una variedad de hongos e insectos, aunque ninguno de los extractos parece tener la toxicidad de amplio espectro necesaria para funcionar en un entorno natural. Puede ser posible combinar extractos para producir un cóctel más efectivo de productos naturales. Al mismo tiempo, es importante recordar que los extractos de productos naturales son, potencialmente, tan tóxicos para los organismos no objetivo como los pesticidas sintéticos. A medida que se exploren estos compuestos, será esencial que se los pruebe en consecuencia para garantizar que no introduzcamos inadvertidamente más moléculas tóxicas en el sistema.

Otro enfoque interesante de productos naturales ha sido el uso de quitosanos para la protección de la madera. Estos compuestos se derivan de las operaciones de cultivo de camarones y están disponibles en grandes cantidades. Se ha demostrado que los quitosanos modificados son eficaces contra una variedad de hongos, aunque su eficacia contra las termitas aún no se ha probado. Sin embargo, ofrecen el potencial de producir compuestos antimicrobianos a partir de lo que es en gran parte un producto de desecho. (Morrell, 2019)

Los productos naturales pueden tener un problema adicional, la lixiviación. Eso podría resolverse con la incorporación de un copreservante que contribuya a su fijación. Y al revés, algunos productos naturales están siendo estudiado como auxiliar para la fijación del boro en la madera. Estos ejemplos resaltan el potencial para desarrollar sistemas alternativos a partir de corrientes de desechos producidas por otros procesos. (Reinprecht, L. , 2016).

Nanopartículas

La nanotecnología se ha señalado como una solución a los problemas ambientales, ya que los conservantes de madera pueden utilizarse en bajas concentraciones, lo que proporciona resultados satisfactorios en términos de protección, sin cambios de color. mediante la aplicación de nanopartículas (NP).

Se han logrado superficies autolimpiables, resistencia a los arañazos y a la intemperie, y propiedades biocidas. Estudios que evalúan el rendimiento de las NP de plata (Ag), boro (B), cobre (Cu), zinc (Zn), óxido de zinc (ZnO), borato de zinc ($B_2O_2Zn_3$) y dióxido de titanio (TiO_2) en la protección de la madera han arrojado resultados prometedores. Pruebas realizadas contra termitas, hongos que pudren, moho y manchas, y degradación por rayos UV han demostrado que algunos biocidas mejoran sus propiedades a escala nanométrica. Las tecnologías de liberación controlada y encapsulación son otro aspecto

importante, ya que pueden aumentar la eficacia de los tratamientos para la madera (Borges, et al., 2018).

La evaluación de riesgos de las NP para la salud humana y el medio ambiente aún es incipiente. A pesar de ello, algunos productos como el nano óxido de zinc (nanoZnO) y el nano dióxido de titanio (nanoTiO₂) presentan un potencial prometedor. Se ha informado que el nanoZnO y el nanoTiO₂ son prometedores agentes antifúngicos, antibacterianos y antivirales; además de sus propiedades biocidas, se prevé un bajo impacto ecotóxico en el medio ambiente. (Borges, et al., 2018) consideran que los tratamientos para la madera basados en nanopartículas (NP) pueden desempeñar un papel importante en la próxima generación de sistemas de protección de la madera.

Tratamientos no biocidas:

La protección de la madera sin biocidas ha sido durante mucho tiempo un objetivo de muchos usuarios de madera. En relación a eso se han desarrollado procesos de modificación de la madera que son tratados en otros puntos en este trabajo.

Sin embargo, sigue existiendo la necesidad de tratamientos no biocidas que sean más ampliamente efectivos contra los agentes de deterioro abióticos y bióticos.

Aditivos no biocidas

Los adyuvantes son sustancias que se agregan a las fórmulas pero que no tienen actividad por sí mismas. Estos aditivos pueden impartir algunas características que permiten que los ingredientes activos funcionen mejor. La intención es identificar un potenciador que ofrezca una ventaja comercial al sistema de tratamiento.

El uso de repelentes de agua para proteger la madera es una práctica común. Agregar un repelente de agua al sistema de tratamiento de la madera protege al conservante de los efectos de la humedad durante un tiempo limitado.

Esta protección temprana extiende la vida útil del conservante por más tiempo que el tiempo inicial proporcionado por el repelente de agua. Una explicación dada por Zahora (2000) es que el repelente de agua permite que el conservante tenga más tiempo para unirse a la madera y, por lo tanto, resistir en última instancia los efectos de la humedad de manera más efectiva.

Los sistemas totalmente basados en carbono plantean algunas preocupaciones, incluida la biodegradación que pueden sufrir los biocidas orgánicos durante su larga vida útil, especialmente por microorganismos que habitan en la madera pero no la degradan, como los mohos y las bacterias. Para abordar estas preocupaciones, se están estudiando aditivos benignos basados en que los hongos de descomposición emplean reacciones de

radicales libres mediadas por metales para degradar la madera. Por lo tanto, los investigadores examinaron la co-adición de antioxidantes benignos y económicos y/o quelantes de metales a los sistemas de biocidas orgánicos. Se descubrió que estos aditivos incrementaban la eficacia de los biocidas orgánicos, a menudo al doble o al triple con una reducción de la lixiviación de varios biocidas orgánicos. Se descubrió también que los antioxidantes efectivamente disuadían a las termitas y aumentaban su mortalidad

Es una oportunidad la búsqueda de sistemas capaces de inhibir a los organismos en dosis cada vez más bajas para minimizar los riesgos colaterales.

Otras técnicas de protección de la madera son las **barreras físicas**¹⁵. Se han desarrollado envolturas de barrera para aplicaciones en contacto con el suelo y están ganando cierta popularidad para proporcionar protección adicional a las partes subterráneas de, por ejemplo, postes de cercas, o estructuras de edificios. Las aprobaciones de la AWWA vigentes para estos hoy en día permiten que las envolturas de barrera se utilicen además de los tratamientos tradicionales aprobados para el contacto con el suelo. Se están realizando investigaciones para determinar el potencial de eficacia a largo plazo de niveles de tratamiento reducidos combinados con aplicaciones de envoltura protectora (Freeman, et. al., 2005).

Tecnologías de impregnación

El desarrollo adicional de los procesos de impregnación con fluidos supercríticos (SCF) o de procesos como el True Core ofrecerían el potencial de superar la naturaleza refractaria inherente del duramen de *E. grandis*.

Asimismo puede ser oportuno, la investigación de pretratamientos que mejoren la difusión de los preservantes en la madera de esta especie, como ser el tratamiento con ultrasonido seguidos de diferentes procesos de aplicación de preservantes,

Oportunidades de mercado de madera preservada

La madera tiene una larga historia de uso en diversas aplicaciones, y los tratamientos de preservación han desempeñado un papel fundamental en la prolongación de su vida útil. Sin embargo, según Morrell (2019) existen algunas oportunidades de crecimiento en el uso de la madera tratada. Entre estas aplicaciones se encuentran la madera utilizada como material de embalaje sólido en el comercio internacional, la madera utilizada en estructuras de madera maciza y un producto de decks de alta gama.

¹⁵ Estos elementos quedan fuera del alcance de este informe.

Embalaje de madera maciza: Los pallets de madera facilitan y agilizan el envío, pero la madera de menor calidad utilizada en estos pallets y otros materiales de embalaje de madera maciza puede albergar insectos y hongos. Estos organismos pueden introducirse inadvertidamente en nuevos entornos durante el envío. Los materiales de embalaje de madera maciza utilizados en el comercio internacional se deben someter a un tratamiento de mitigación. Los dos tratamientos más comunes son el calentamiento a 56 °C durante 30 minutos o la fumigación con bromuro de metilo. La efectividad de estos tratamientos no se puede verificar directamente y tampoco pueden prevenir la reinfestación. La preservación puede proporcionar un método más verificable para limitar el riesgo de introducción de plagas, que además proporciona protección a largo plazo contra la re-invasión. Es posible que preservar madera infestada no elimine los problemas pero al menos impide el desarrollo. Claramente, se necesita mucho trabajo adicional antes de que la preservación se apruebe como herramienta de mitigación, pero los volúmenes de madera utilizados en esta área bien valen la pena el esfuerzo.

Preservantes admitidos para el contacto con alimento pueden ser relevantes para embalajes para estos productos.

Estructuras de madera maciza: Las estructuras de madera maciza incluyen materiales compuestos como vigas laminadas encoladas o clavadas, madera laminada enchapada, paneles de contrachapado macizo y madera contralaminada (CLT)

Todos estos compuestos se están utilizando cada vez más en climas más templados como parte de los esfuerzos para competir con el hormigón y el acero en el mercado de la construcción de mediana y gran altura. Estudios preliminares de campo ya han demostrado que estos materiales son susceptibles al ataque de termitas y hongos. Si bien estos materiales se utilizan con bajos contenidos de humedad, necesitarán algún tipo de protección contra la degradación biológica para la eventualidad de que se humedezcan.

La protección no implica necesariamente una preservación intensiva de la madera, pero el hecho de que todos los edificios eventualmente experimenten cierto grado de intrusión de humedad significa que estas estructuras también la experimentarán. Se requerirá algún tipo de tratamiento para garantizar su durabilidad. Parece existir cierta reticencia a utilizar preservantes de madera tradicionales en esta aplicación, pero pueden explorarse alternativas. Es posible utilizar tratamientos superficiales con boro u otro preservante de bajo impacto ambiental en elementos individuales de un producto compuesto para proporcionar cierta protección adicional, siempre que el tratamiento no afecte negativamente a la adhesión.

Decks: El mercado más prometedor para la madera tratada sigue siendo el de los decks. La madera tratada dominó este mercado durante mucho tiempo, aunque el WPC ha erosionado su cuota de mercado. Esta disminución ha sido enmascarada debido al crecimiento del mercado general de este producto. Los consumidores ya han mostrado su disposición a pagar más del doble del precio de una terraza de madera tratada por una de WPC. Claramente, existe la oportunidad de crear una terraza mejor, competitiva en precio con respecto a los productos de WPC, pero que incorpore características que la hagan más duradera y visualmente atractivas durante más tiempo. Estas características podrían incluir un preservante de madera a orgánico, la selección de materiales más estables (corte radial) y la aplicación de estabilizadores UV a la madera. De esta forma no se competiría con los decks de madera tradicionales de menor costo, sino con el producto de gama alta.

5.3.2 ESTADO DEL ARTE MODIFICACIÓN TÉRMICO

La modificación térmica surge en Europa, y como tal, ha sido la región pionera y la que ha impulsado la expansión de la tecnología. Se destaca un sostenido aumento de la producción, sobre todo en la última década, donde la producción de MTM europea se ha triplicado, pasando de 200.000 m³ en 2017 a un estimado de 700.000 m³ en 2021 (Jones and Sandberg, 2020). Como la tecnología es rentable a pequeña escala, y los equipos están comercialmente disponibles, la popularidad de la MTM proviene de los pequeños aserraderos de alcance local. Casi un tercio de la madera térmicamente modificada europea es obtenida a través del proceso ThermoWood (200.000 m³/año), mientras que los demás procesos relevantes son Plato, IVSE, Jartek, entre otros.

Considerando otras regiones del mundo, China es donde se encuentra el otro foco de producción importante. Se estima que la capacidad de producción supera los 200.000 m³/año, siendo en su mayoría tratamientos moderados. Estados Unidos se ubica en tercer lugar, con una producción anual de 100.000 m³. Si se toma en cuenta la dimensión del mercado de la madera estadounidense, el desarrollo de la MTM ha sido muy bajo. En Canadá tampoco se han alcanzado volúmenes importantes, estimándose una producción de 30.000 m³/año, siendo en su gran mayoría a través del proceso de ThermoWood.

Más allá de las regiones mencionadas, no se encuentran establecidas otras producciones con escalas importantes. En el caso de Australia y Sudáfrica, la MTM comercializada proviene fundamentalmente de la importación. En Nueva Zelanda, en cambio, existen pequeñas plantas de producción de MTM de pino radiata, pero aún sin aportar volúmenes relevantes. En América Latina, en Brasil existen dos empresas que producen MTM, pero la producción es aún limitada en el entorno de 3.000 m³.

En Uruguay es de destacar que existe una empresa, Maderera Piedra del Toro, que desde 2021 produce MTM. Tienen una capacidad de producción de

2.000 m³ anuales. El método de tratamiento es el ThermoWood, y producen madera modificada de pino y eucalipto.

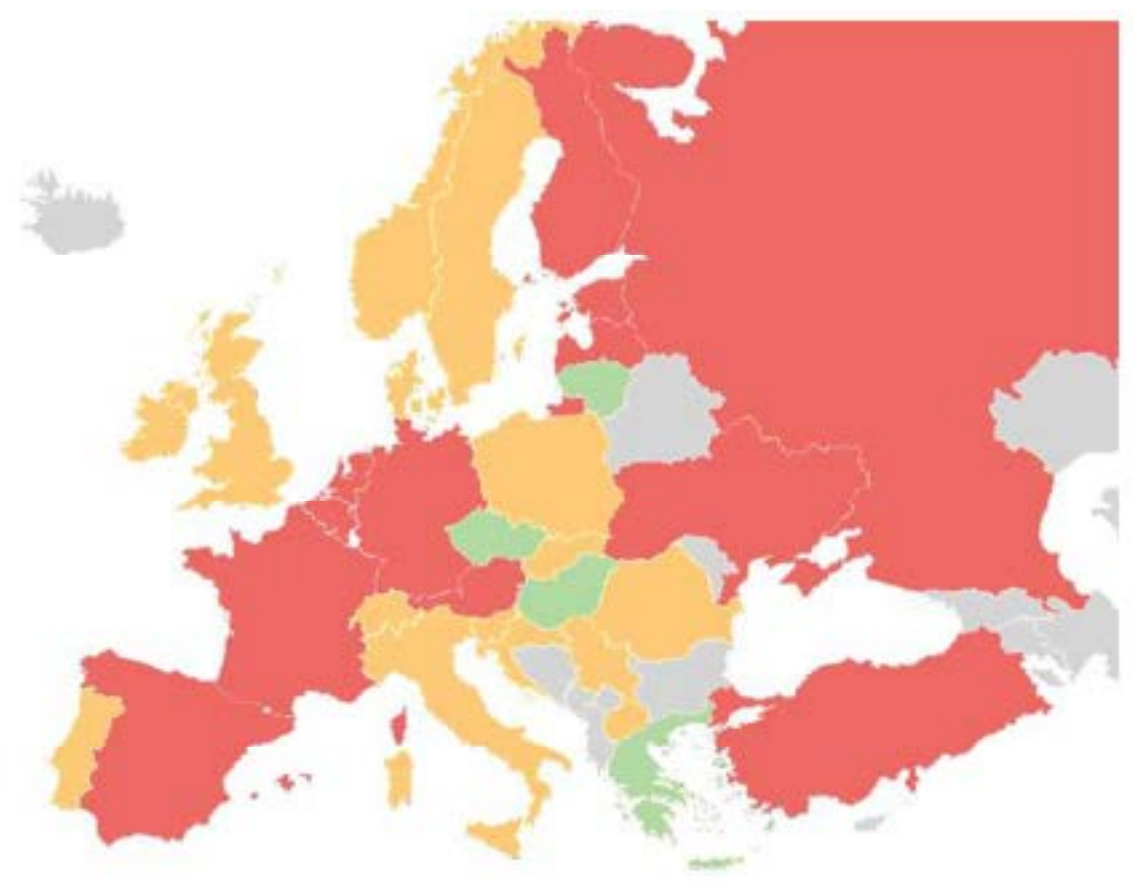


Ilustración 1. Producción de madera térmicamente modificada en Europa al año 2020. Rojo: Producción mayor a 10.000 m³/año; Naranja: producción menor a 10.000 m³/año; Verde: sin datos de volumen de producción; Gris: Sin datos de producción (Jones and Sandberg, 2020) .

5.3.2.1 PRODUCTOS Y PROCESOS DISPONIBLES

Existen diversos tratamientos térmicos para obtener madera térmicamente modificada (MTM). La mayoría están en un estado desarrollado, donde la tecnología para producir MTM está disponible comercialmente. Si bien todos se basan en principios y reacciones químicas similares, la diferencia entre ellos radica en el método de desplazamiento o reducción del contenido de oxígeno de la atmósfera de tratamiento. Esto tiene impactos, en algunos casos, en la extensión de distintas reacciones químicas y, por ende, en el grado de modificación y las propiedades mecánicas de la madera.

Estado de la tecnología	Nombre	Descripción General	Particularidades
Comercial	ThermoWood	Tratamiento a presión atmosférica con concentraciones de oxígeno entre 3 y 5%.	Se logra buena estabilidad dimensional por la atmósfera de vapor

		Tratamiento entre 185 y 230 °C con una etapa previa de secado	que previene rajaduras
Comercial	PLATO	Dos etapas a temperaturas moderadas (160-190°C) con atmósfera de vapor con una etapa intermedia de secado en un horno convencional	Las condiciones más moderadas limitan las reacciones secundarias no deseadas
Desarrollo	Rectification	Calentamiento de madera seca hasta temperaturas altas (210-240°C) en atmósfera de nitrógeno	El objetivo principal es reducir el comportamiento hidrófilo de la madera
Comercial	Le Bois Perdure	Mismo principio que ThermoWood, pero se tratan tablas verdes y se genera la atmósfera de modificación con el contenido de agua de la madera	El proceso comienza con tablas verdes, lo que permite saltarse la etapa de secado en otra instalación/equipo
Comercial	Oil Hot Treatment (OHT)	Calentamiento en baño de aceite de linaza	Permite un mayor flujo de calor y un buen desplazamiento del oxígeno
Comercial	WTT Thermotreat 2.0	Calentamiento a presión (7-10 bar) con poca adición de vapor y sin oxígeno.	La presión permite reducir el tiempo de reacción
Comercial	FirmoLin	Calentamiento a temperaturas moderadas (140°-180°C) en atmósfera de vapor, a 10 bar de presión	Las menores temperaturas reducen las reacciones no deseadas
Desarrollo	Termovuoto/Timura	Tratamiento a vacío que permite acelerar el proceso de secado de la madera	Tiene alta eficiencia energética y menor corrosión de equipos

5.3.2.1.1 THERMOWOOD

El proceso de modificación térmica más difundido en el mundo es el de ThermoWood (R), desarrollado en Finlandia en 1993 y patentado por el Technical Research Centre of Finland (VTT). Actualmente la patente es propiedad de la

International Thermowood Association. El proceso, que dura entre 24 y 48 horas, consta de una rampa de calentamiento hasta unos 180°C, donde se la madera se seca, luego se mantiene la temperatura (entre 190 y 230°C) constante durante unas 2 horas donde transcurre la parte sustancial de la modificación térmica, y finalmente la etapa de acondicionamiento donde se enfría la madera y se vuelve a humidificar. Para desplazar el oxígeno se utiliza vapor de agua. En la se resumen las condiciones de tratamiento según esta tecnología.

El proceso ThermoWood es apto tanto para tablas de madera de frondosas como coníferas. En base al tipo de madera, y la temperatura alcanzada, es que se clasifica la madera según la aptitud de uso. ThermoWood tiene su propia clasificación, en la que se distingue la Thermo-S para los tratamientos más suaves (190°C) y la Thermo-D para el tratamiento más intenso (212°C). La diferencia radica en que la Thermo-D será más oscura, más resistente al clima y con una mayor estabilidad dimensional (Thermowood Handbook). En la tabla a continuación se distingue el uso recomendado para maderas de coníferas, en base a la clasificación de ThermoWood.

	Thermo-S conífera	Thermo-D conífera
Revestimiento interior	Si	Si
Pisos	Si	Si
Fijaciones	Si	Si
Muebles	Si	Si
Espacios húmedos interiores	Si	Si
Ventanas y paredes	Si	Si
Revestimiento exterior	No	Si
Mueble exterior	No	Si
Pérgolas	No	Si
Cercas	No	Si

En base a la normativa europea EN 335 y EN350 de aptitud y durabilidad, respectivamente, la madera ThermoWood de coníferas alcanza los siguientes estándares:

Durabilidad (EN350)	Usos (EN 335)	Aptitud ThermoWood
1 = Muy durable	5= expuesto a agua del mar 4 = en contacto con agua	No
2= Durable	3= exterior, expuesta al clima	Thermo-D y alguna especie Thermo-S
3= Moderadamente durable	2= exterior, protegida del clima	Thermo-D y Thermo-S

4 = Poco durable	1= interior en condiciones secas	Supera
-------------------------	----------------------------------	--------

5.3.2.1.2 PLATO

De acuerdo con Militz (2002) el primer desarrollo tecnológico de modificación térmica en Europa fue el proceso Plato en Países Bajos, patentado en 1998. En este caso el proceso de termotratamiento se divide en dos etapas, con una etapa intermedio de secado. En la primera, se calienta la madera a una temperatura entre 160 y 190°C en una atmósfera de vapor saturado, con una presión superior a la atmosférica. Posteriormente, la madera es secada de forma convencional en una cámara de secado, para luego una segunda etapa de modificación térmica con vapor sobrecalentado entre 170 y 190°C.

5.3.2.1.3 LE BOIS PERDURE

La característica original de esta variante es que las tablas ingresan al tratamiento verdes, sin un proceso de secado previo. De esta forma, el proceso se beneficia por dos aspectos. En primer lugar, se ahorra tiempo al evitar una etapa intermedia y luego, se aprovecha el propio contenido de agua de la madera para generar la atmósfera de vapor que permite desplazar el oxígeno. Este método, desarrollado en Francia, ha sido aplicado por alguna empresa en Canadá (OLGA)

5.3.2.1.4 WTT

Una variante del método ThermoWood es el denominado WTT, por las siglas de la empresa danesa que lo desarrolló (Wood Treatment Technology). A diferencia del ThermoWood, en el WTT el tratamiento se realiza a altas presiones (hasta 20 bar), lo que permite reducir la temperatura y el tiempo de reacción, para alcanzar un grado de modificación comparable. En este caso, los ahorros de tiempo de todo el proceso son de unas 12 horas, comparado con el ThermoWood, mientras que la temperatura máxima es de 180°C (OLGA).

5.3.2.1.5 FIRMOLIN

Esta variante tecnológica fue desarrollada también en Países Bajos, y su principio básico es la de utilizar temperaturas más bajas, del entorno de 150 y 180°C. De esta forma, los desabolladores afirman que se alcanzan óptimas condiciones de durabilidad, manteniendo de forma aceptable la resistencia mecánica de la madera. Debido a las menores temperaturas, se utiliza aumentos de presiones (hasta 10 bar) para acelerar el proceso y lograra las reacciones deseables en la madera. La empresa desarrolladora FirmoLin, comercializa la madera, además de ofrecer servicios técnicos y equipamiento para desarrollarlo.

5.3.2.1.6 OIL HEAT TREATMENT

La empresa alemana Menz Holz desarrolló la variante de modificación térmica en la cual el proceso se lleva a cabo en aceite vegetal como medio calefactor

y desplazante de oxígeno. La temperatura del aceite empleado es de 180 a 220°C, durante un tiempo de 2 a 4 horas. Esta empresa es la que tiene patentado el proceso, y es quien comercializa este tipo de madera.

5.3.2.1.7 RECTIFICATION

En este proceso de modificación térmica se desplaza el oxígeno mediante una atmósfera de nitrógeno. Este método se utiliza principalmente a escala laboratorio para realizar ensayos por los costos elevados del nitrógeno, que tiene como ventaja su practicidad frente a reactores con vapor a pequeña escala.

5.3.2.1.8 TERMOVUOTO

El desarrollo conjunto de investigadores suecos e italianos de la variante tecnológica en la que se utiliza vacío como método de remoción del oxígeno es denominado Termovuoto. No se dispone información sobre procesos a escala comercial. De forma similar al proceso de rectificación, presumiblemente sea más económico realizar la remoción de oxígeno con vapor de agua generado in situ.

5.3.3 ESTADO DEL ARTE DE LA MODIFICACIÓN QUÍMICA

La investigación en modificación química de madera comienza en la primera mitad del siglo 20, con los trabajos de Alfred Stamm y sus colegas del *Forest Products Laboratory* de Madison, Wisconsin, durante los 1940s y 1950s. Sin embargo, los primeros intentos de modificación química a nivel industrial fueron realizados por la familia Nobel en San Petersburgo en 1840, que desarrollaron el proceso denominado "endurecimiento de madera", que luego de ser mecanizado produjo ruedas para la armada rusa (Militz, 2020; Sandberg et al, 2021). En las últimas décadas, muchas de las investigaciones han alcanzado el nivel productivo y de acuerdo con Militz (2020) hoy en día se producen en Europa entre 300.000 y 400.000 m³ de madera modificada, que debe sumarse a la producción de China, cuyos datos no se conocen. Dentro de esas cifras aproximadamente 100.000 m³ corresponden a madera químicamente modificada por acetilación y furfurilación (Mantanis, 2017).

Europa y EE. UU. producen unos 60.000 m³ de madera acetilada que es comercializada al mundo por Accsys, bajo las marcas Accoya, y Tricoya (paneles de MDF producidos con fibras de madera acetilada). La madera furfurilada, es producida en Noruega por Kebony, 20.000 m³/año, y en los Países Bajos por Foreco Dalfsen, 1.000 m³/año.

La madera modificada con DMDHEU, fue comercializada entre 2010 y 2016, operada por la compañía BASF, bajo la marca registrada Belmadur. Dejó de comercializarse en 2016, y ahora la marca Belmadur corresponde a madera

modificada con glioxal. En Nueva Zelanda, se comercializa solo bajo pedido (excepcionalmente) por la empresa Abodo (Eco-Timber).

La madera tratada con silicatos y silanos, protegida superficialmente se comercializa con la marca Everwood (Ecobeton), y cuando se aplican geles basados en tetraetoxisilano, se comercializa como TEOS. También se comercializan productos con efecto hidrofóbico y antiséptico para tratar madera, que muchas veces se comercializa ya tratada; ejemplos son los productos de la compañía Prebona (Suiza) basados en coloides de ácido silícico modificado, los productos de Nano-skin de Bélgica o los de Organowood, Suecia. Otra marca bajo la cual se comercializa la madera tratada con silicatos es *TimberSIL*, en los países Bajos.

5.3.3.1 PRODUCTOS Y PROCESOS DISPONIBLES

Estado de la tecnología	Nombre	Descripción General	Particularidades
Comercial	Accoya	Impregnación con anhídrido acético y curado a temperatura superior a 80°C	Mejora la estabilidad dimensional, la durabilidad sin pérdida de propiedades mecánicas
Comercial	Kebony	Impregnación con alcohol furfurílico o sus derivados y curado y secado del producto final	Mejora la estabilidad dimensional, la durabilidad, sin pérdida de propiedades mecánicas. La madera se oscurece.

5.3.3.1.1 ACETILACIÓN

Accoya es marca registrada, y sus productos tienen una expectativa de vida útil por encima de suelo de 50 años, Clases de uso 1, 2 y 3 y de 25 años en tierra húmeda para Clase de uso 4, de acuerdo con las definiciones presentadas en la norma EN 335 (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2014).

5.3.3.1.2 FURFURILACIÓN

La empresa Kebony de Noruega produce dos productos, *Kebony character* (producida con pino silvestre y se usa en decks, techos con membrana impermeabilizante y muebles exteriores) y *Kebony Clear* (producida con pino amarillo del sur, más oscura y dura, se utiliza en pisos). También son empleadas en revestimientos, calles, aplicaciones marítimas, pasarelas y botes. En Alemania, es recomendado su uso en ventanas y fachadas; Clases de uso 1, 2 y 3.

Nobelwood, producida por Foreco Dalfsen, a partir de resinas de alcohol furfúrico pre polimerizado, agrega retardantes de llama estables en usos exteriores, que ubican el producto final en una clase de uso correspondiente al grado más alto posible para madera (Euroclass B) (Sandberg et al 2021).

5.3.3.1.3 DMDHEU

La madera modificada con DMDHEU, con una ganancia de masa de 6% es apta para una Clase de uso 3, en tanto que con un 15% de ganancia de masa, es apta para Clase de uso 1. Existen ensayos en Australia encima de suelo y en contacto con suelo, que muestran que la madera continúa protegida luego de 5,5 años de exposición, pero hacia los 9 años, se ve afectada a pesar de la resistencia a los basidiomicetos descomponedores (Emmerich et al. 2020). También se emplea madera modificada con DMDHEU en la producción de *plywood* (tableros contrachapados) y LVL¹⁶ (*Laminated veneer lumber*).

5.3.3.1.4 IMPREGNACIÓN CON RESINAS:

Compreg es marca registrada. Sus productos se emplean en Clase de uso 1 y 2 (muebles y pisos interiores) y Clase de uso 3 (muebles exteriores, decking y elementos constructivos).

En Francia la madera tratada con resinas fenol-formaldehído y densificada se comercializa como *Permawood* o como *Lignostone*.

En el caso de *Impreg*, también es marca registrada, apta para clase de uso 1, tableros de pared y pisos interiores.

5.3.3.1.5 SILICATOS Y SILANOS

La madera impregnada con silicatos conocida como TimberSil producida por Timber Treatment Technologies asegura tener resistencia a hongos de pudrición y termitas (TimberSil, 2011). Sin embargo, un estudio reciente de este producto

¹⁶ Material compuesto por chapas de madera encoladas en la dirección de la fibra que puede ser utilizado con funciones estructurales

en ensayos de campo según normas AWP A E26 (proximidad de suelo) y AWP A E34 (test sándwich) conducidos en forma comparativa con otros productos comerciales han encontrado que el tratamiento no le ha aportado resistencia frente a hongos descomponedores (Konkler & Morrell, 2023).

La madera modificada comercializada por *Organowood*, es adecuada para una Clase de uso 1 (se emplea en decks, postes y en construcción). Estos procesos mejoran las propiedades físicas, en particular la estabilidad dimensional, pero se reduce la resistencia a la flexión, que es dependiente de la temperatura de curado. Sin embargo, la madera tratada con tetraetil ortosilicato no varía la resistencia a la flexión y el módulo de Young es ligeramente modificado.

En general las maderas tratadas con silicatos tienen un efecto negativo en máquinas y herramientas utilizadas para trabajarlas.

6 ASPECTOS DE SOSTENIBILIDAD

En esta sección se da información básica del comportamiento de los preservantes de madera en el ambiente, lo que incide en los niveles de exposición, y por tanto en el riesgo ambiental y para la población general asociados al uso de dichas sustancias. También se mencionan características toxicológicas y ecotoxicológicas.

Para una visión más integral de la sostenibilidad ambiental se citarán estudios de análisis de ciclo de vida (LCA) sobre el empleo de preservantes de madera, que son particularmente interesantes en la comparación de las distintas alternativas de preservación. Estas comparaciones entre preservantes, desde el momento que contemplan todo el ciclo de vida, no pueden generalizarse de forma independiente al uso de la madera tratada. Por tanto, las comparaciones estarán limitadas a los estudios publicados disponibles.

Las dimensiones social y económica de la sostenibilidad están contempladas, al menos en forma parcial, en los riesgos a la salud para los trabajadores y la población en general (social) y en la sección de evaluación técnico – económica de este informe.

En la medida que a nivel internacional crecen las presiones por preservantes menos tóxicos y más amigables con el ambiente, se procura sustituir los preservantes que pueden denominarse históricos por alternativas más sostenibles. Dentro del grupo de históricos se encuentran por un lado las formulaciones con base en aceite, como la creosota, el pentaclorofenol (PCP) y el naftenato de cobre, y por otro los arsenicales con base acuosa, como el CCA. Esta tendencia ya se ve reflejada en distintas normativas nacionales y regionales, que restringen fuertemente su uso, establecen un plan de eliminación gradual o directamente ya están prohibidos.

Como consecuencia de lo anterior, es más probable que las investigaciones actuales que involucren los preservantes históricos estén enfocadas en mejores prácticas de manejo, eliminación, reciclaje y remediación de la madera tratada y/o limpieza de suelos contaminados.^[1] Por tal razón, esta sección está estructurada separando los preservantes históricos de las sustancias de segunda generación y de las que están en desarrollo, así como de las metodologías de preservación por modificación térmica o química de la madera.

6.1 PRESERVANTES DE MADERA HISTÓRICOS

6.1.1 PRESERVANTES EN FORMULACIONES CON BASE DE ACEITE

Hace décadas, la Unión Europea prohibió el uso de PCP y creosota, ambos preservantes a base de aceite. Estas dos sustancias han sido nominados como pesticidas de uso restringido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA) debido a preocupaciones sobre su eliminación.

6.1.1.1 CREOSOTA

Actualmente, la creosota se utiliza únicamente con fines comerciales; no tiene usos residenciales registrados. La creosota es un pesticida de uso restringido que se puede utilizar en entornos al aire libre, como durmientes de ferrocarril y postes de servicios públicos. Se prohíben las aplicaciones de creosota en interiores, así como la aplicación a madera destinada a uso en interiores o para uso en contacto con alimentos, raciones animales o agua potable.^[2]

La creosota deriva de la destilación de alquitrán de hulla o de pirólisis de la madera, por lo que puede tener un origen fósil. Es una mezcla de 200 a 250 sustancias identificables; de ellos, el 85% son hidrocarburos poli aromáticos (PAHs), que son los que entonces tienen mayor peso en la evaluación de riesgo y en el comportamiento de la sustancia en el ambiente.^[3]

Dado que la mayoría de los PAHs no son solubles en agua, estos sufren fotooxidación en el agua superficial y sus vidas medias de fotooxidación son cortas. Por lo tanto, la fotooxidación parece ser una vía de disipación importante para los PAHs.

Varios estudios han demostrado que los PAHs de los durmientes de ferrocarril tratados con creosota se filtran inicialmente a un ritmo más alto, pero posteriormente no muestran un gran grado de migración descendente en los suelos. Los estudios también indican que la mayoría (85%) de los PAHs permanecen dentro de la madera tratada. Varios estudios muestran también que los PAHs tienen tendencia a biodegradarse en suelos en condiciones aeróbicas. Más del 80% de la biodegradación se produce dentro del primer mes después de que la madera tratada esté en uso.

Sin embargo, muchos estudios han demostrado que los productos a de los PAHs en las aguas superficiales y en los suelos superficiales son persistentes y bioacumulativos y afectan negativamente a la biota acuática y a los organismos de los suelos y sedimentos.² Por tanto, desde el punto de vista ecotoxicológico la creosota puede presentar riesgos para los peces y los invertebrados cuando se utiliza madera tratada con creosota en estructuras acuáticas y ferroviarias.

La creosota plantea riesgos significativos, tanto cancerígenos y como no cancerígenos, a la salud de los trabajadores de las instalaciones de tratamiento de madera, pero la EPA no encontró dichos riesgos para el público en general, ni para los trabajadores que manipulan madera tratada con creosota después de la aplicación.^[4]

La disposición final de madera tratada con creosota requiere precauciones. Si bien la U.S. EPA habilita eventualmente la disposición doméstica junto con los residuos municipales, tanto la administración pública como los generadores privados no domésticos deben evaluar si la madera tratada clasifica como residuo peligroso por su volumen y concentración. También se indica evitar la quema de madera tratada en ambientes domésticos.

6.1.1.2 PENTACLOROFENOL (PCP)

Mientras que el PCP ya está prohibido en Europa, en USA no hay actualmente usos residenciales registrados para el PCP y está restringido a propósitos comerciales, mayormente el tratamiento de postes de electricidad. Este uso del PCP se eliminará gradualmente durante cinco años a partir de 2022: desde el 29 de febrero de 2024 ya no puede producirse, venderse o distribuirse preservantes con PCP, en tanto la producción de madera tratada (sólo mediante tratamiento térmico o a presión) debe terminar el 28 de febrero de 2027. La decisión se basa en que, existiendo otras alternativas, los beneficios de usar este preservante no justifican los riesgos a la salud de los trabajadores expuestos al PCP.^[5]

El PCP y sus micro impurezas (dioxinas y furanos) plantean riesgos significativos a la salud, tanto cancerígenos y como no cancerígenos, para los trabajadores de las instalaciones de tratamiento de madera. Se estima que la exposición (y por lo tanto el riesgo) para las personas que viven cerca de postes de servicios públicos tratados con PCP es mínima. La aplicación de PCP a madera destinada a uso en interiores está prohibida, excepto para algunos usos de baja exposición (p.ej. estructuras de soporte en contacto con el suelo en galpones o sitios similares).

El comportamiento químico y las propiedades físicas del PCP dependerá de si existe principalmente como fenol (en condiciones más ácidas) o como anión fenolato (en condiciones básicas). En agua el PCP es estable frente a la hidrólisis, pero es susceptible a la fotodegradación, que es más rápida en condiciones básicas.

La madera tratada con PCP puede liberar el compuesto mediante volatilización o lixiviación. Además, el PCP puede fotodegradarse en la superficie de la madera, lo que hace que los productos de degradación estén disponibles para la lixiviación. Los procesos anteriores se ven afectados por los solventes utilizados en la aplicación del compuesto, en tanto la lixiviación del PCP también puede depender parcialmente del método de aplicación (tratamiento térmico o a presión). Dicha lixiviación puede ocurrir en la superficie de los postes por el agua de lluvia o en su eje interior por el solvente, que es el mecanismo principal. Estudios han demostrado que cuando se aplica en aceite, el PCP se transporta rápidamente desde la parte superior del poste a la parte subterránea en los primeros años, para tornarse relativamente constante con el tiempo. La movilidad en el suelo del PCP puede estar afectada por los solventes aplicados junto con el PCP y que lixivian como éste.

Debido a la tendencia demostrada por el PCP para adsorberse en los suelos y la degradación moderadamente rápida del compuesto en el ambiente, es poco probable que el agua subterránea se contamine a partir de postes de servicios públicos, excepto en situaciones donde la parte inferior del poste está directamente en contacto con el nivel freático (o con un nivel freático fluctuante) o donde la lixiviación ocurre desde múltiples postes en un área de almacenamiento o de tratamiento de madera.

El PCP es un compuesto relativamente volátil, pero no desde una fase acuosa. En la atmósfera puede fotodegradarse, reaccionar con radicales libres o asociarse a partículas de polvo o humedad, que por deposición húmeda pasan al medio terrestre, acuoso o biótico.

El PCP es muy tóxico para los organismos acuáticos no objetivo y para las abejas, en tanto es ligeramente tóxico para las aves. Sin embargo, se estima que la exposición de estas especies al PCP y sus productos de degradación es limitada. Por lo tanto, la EPA no espera riesgos significativos para los organismos acuáticos y terrestres, incluidos los polinizadores.

Los lineamientos para la disposición de madera tratada con PCP son los mismos que se mencionaron más arriba para la madera tratada con creosota.

El documento de U.S. EPA fuente de la información anterior^[6] brinda mayor detalle de la toxicología, ecotoxicología y comportamiento en el ambiente del PCP.

6.1.1.3 NAFTENATO DE COBRE (CUN)

El naftenato de cobre es algo menos efectivo que el PCP, pero es unas 10 veces menos tóxico para humanos que éste. A pesar de esta ventaja respecto a los otros dos preservantes en base aceite, su uso está mucho menos difundido. De hecho, el registro de sustancias químicas europeo ECHA^[7], no indica usos como preservante de madera, si bien menciona la potencial liberación al ambiente desde madera ya tratada. Por otro lado, U.S. EPA sí cuenta con un documento de registro de pesticidas de U.S. EPA específico para CuN como preservante de madera^[8].

U.S. EPA concluye en relación con los riesgos para la salud humana por exposición al CuN que todos los escenarios ocupacionales y residenciales no presentan un riesgo significativo, a excepción de un escenario de exposición ocupacional (tareas de limpieza en el proceso de tratamiento de difusión por inmersión). No se prevén exposiciones al CuN a través de la dieta o el agua potable con los patrones actuales de uso de este preservante.

Los efectos ambientales son más críticos, dado que el CuN en ambientes acuáticos se disocia en ácido nafténico y cobre iónico, y éste último es clasificado como muy altamente tóxico para las especies acuáticas. El cobre es un metal que no sufrirá hidrólisis o fotodegradación en agua, degradación biológica ni mineralización. Una vez liberado de la madera tratada, el cobre formará complejos orgánicos y se absorberá en materia orgánica en la columna de agua y en los sedimentos. Para el cobre iónico, la sorción es el proceso ambiental dominante que afecta la disponibilidad de cobre en el medio acuático. Los parámetros ambientales abióticos que controlan la disponibilidad de metales incluyen el pH, la dureza del agua, la salinidad y la concentración de materia orgánica.

U.S. EPA modeló la dispersión en el ambiente del ion cobre desde madera tratada, tanto para usos terrestres (terrazas) como acuáticos (muelles). Ningún escenario terrestre resultó con riesgos significativos. Por otro lado, los escenarios acuáticos con alta tasa de lixiviación (agua a pH 5) presentaban riesgos por encima del nivel de alerta para todas las especies, tanto de agua dulce como agua salada, a excepción de plantas vasculares (macrófitas) no listadas (especies no amenazadas). En los escenarios acuáticos con baja tasa de lixiviación (agua a pH 7), ninguna especie acuática está expuesta a riesgos significativos, a excepción de las plantas no vasculares (diatomeas, cianobacterias) de especies listadas (especies amenazadas).

Los lineamientos para la disposición de madera tratada con CuN son los mismos que se mencionaron más arriba para la madera tratada con PCP o creosota.

6.1.2 PRESERVANTES ARSENICALES CROMADOS

El arseniato de cobre cromado (CCA) es uno de los preservantes de madera más importantes en los últimos 70 años (junto con otro arsenical en base acuosa, pero sin cromo, el arseniato de cobre amoniacal (ACA)).^[9] En los párrafos siguientes se resumen los riesgos a la salud y ambientales identificados por U.S. EPA.^[10]

En lo relativo a los riesgos para la salud, U.S. EPA concluyó que no se prevén riesgos residenciales, a través de la dieta o incidentes por ingestión, porque no se espera que los usos de los arsenicales cromados resulten en exposiciones residenciales o en la dieta (incluyendo el agua potable).

Se identificaron riesgos significativos por exposición ocupacional de largo plazo al arsénico de los operarios que manipulan el preservante, tanto para exposición dérmica como por inhalación, y tanto para riesgo cancerígeno como no cancerígeno. Para el cromo se identificaron los mismos riesgos significativos, con

la diferencia de que la exposición dérmica puede mitigarse con el uso de equipo de protección personal (EPP).

En la exposición ocupacional por inhalación post-aplicación de polvo (en aserrado y lijado de madera tratada), U.S. EPA identificó riesgos significativos de cáncer para arsénico si se considera toda la vida laboral. Por otro lado, la exposición en plazos cortos e intermedios al arsénico no generaría riesgos no vinculados al cáncer por encima de los niveles de alerta. En cuanto al cromo hexavalente, ya varios escenarios de exposición en plazos cortos e intermedios resultaban en riesgos no vinculados al cáncer por encima de los niveles de alerta.

U.S. EPA encontró en 2021 cinco incidentes de salud humana reportados con arsenicales cromados y ácido dicrómico en los cinco años previos al relevamiento, uno de ellos fatal. La información de los reportes no era suficiente como para extraer conclusiones acerca de la exposiciones o causas (p.ej. si hubo un uso indebido).

Para los patrones de uso actual no se esperan exposiciones, ni por tanto riesgos, para organismos terrestres. Para organismos acuáticos, U.S. EPA evaluó los riesgos agudos y crónicos por separado para cobre, arsénico y cromo. Se consideraron escenarios de agua dulce y salada, con dos cantidades de muelles⁸⁰: uno de seis y otro de uno con exposición más alta por mayor lixiviación y proximidad de los organismos. En la *Tabla 1* se muestran los resultados, marcando los riesgos significativos.

Tabla 12. Resultados de evaluación por parte de U.S. EPA⁸⁰ de los riesgos agudos y crónicos para cobre, arsénico y cromo considerando escenarios de agua dulce y salada, para uno y seis muelles.

		Agua salada											
Escenario →		6 muelles						1 muelle (lixiviado concentrado)					
Metal →		Cu		Cr		As		Cu		Cr		As	
Exposición →		Aguda	Crónica	Aguda	Crónica	Aguda	Crónica	Aguda	Crónica	Aguda	Crónica	Aguda	Crónica
Invertebrados acuáticos	Lixiviados	x	x					x	x		x		x
	No lixiviados							x	x		x		x
Peces	Lixiviados							x	x				
	No lixiviados							x	x				
Plantas	Lixiviados	x	x					x	x				x
	No lixiviados							x					x

		Agua dulce											
Escenario →		6 muelles						1 muelle (lixiviado concentrado)					
Metal →		Cu		Cr		As		Cu		Cr		As	
Exposición →		Aguda	Crónica	Aguda	Crónica	Aguda	Crónica	Aguda	Crónica	Aguda	Crónica	Aguda	Crónica
Invertebrados acuáticos	Lixiviados	x	x				x	x	x		x		x
	No lixiviados		x				x	x	x		x		x
Peces	Lixiviados	x						x	x				
	No lixiviados							x	x				
Plantas	Lixiviados	x						x	x				x
	No lixiviados							x	x				x

En la consulta pública del documento de U.S. EPA se recibieron comentarios cuestionando que la evaluación no considera la toxicidad aditiva o incrementada del arsénico, cobre y cromo combinados, ni tampoco

exposiciones complejas a estos compuestos. La respuesta de U.S. EPA^[11] fue que no tiene conocimiento de dato alguno sobre la salud humana que sugiera efectos adversos sinérgicos por la exposición a la combinación de cobre, arsénico y cromo. Agrega que ya se identificaron riesgos importantes a partir de las evaluaciones del arsénico inorgánico y el cromo hexavalente, lo que resultó en la cancelación de todos los usos, excepto los industriales/comerciales, de la madera tratada con CCA. En cualquier caso, el efecto combinado de la exposición a la mezcla de CCA no se puede cuantificar en este momento debido a la falta de datos sobre la toxicidad de la mezcla y a la incapacidad actual de modelar las exposiciones a las mezclas debido a las limitaciones de los enfoques de modelización actuales.

6.1.3 EVALUACIÓN DE BENEFICIOS Y ALTERNATIVAS ENTRE PRESERVANTES HISTÓRICOS

La Oficina del Programa de Pesticidas (OPP) de U.S. EPA, en su División de Análisis Biológico y Económico (BEAD) evaluó los beneficios del uso del CCA tipo C^[12] (CCA-C) frente a otro preservante arsenical como es el arseniato amoniacal de cobre y cinc (ACZA)^[13] y los históricos basados en aceite: creosota, PCP y CuN. Una discusión detallada de los beneficios y alternativas puede consultarse en los documentos de U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency, 2021) (United States Environmental Protection Agency, 2021).

Los beneficios que se comparan se refieren en general a aspectos funcionales y de experiencia de usuario, que no necesariamente se asocian a aspectos estrictamente ambientales. No obstante, tienen que ver con la sostenibilidad, el enfoque de ciclo de vida y la economía circular. Por ejemplo, la durabilidad es un parámetro crítico en los indicadores de economía circular.

En general, los preservantes con base en aceite pueden dejar las superficies de madera tratada con texturas pegajosas o incluso exudando aceite. Además, usualmente el aceite empleado como solvente de soporte durante el tratamiento a presión le confiere a la madera tratada un olor que puede generar molestias. Por último, la madera tratada con preservantes en base aceite que queden inmersos en agua pueden dejar un brillo aceitoso en la superficie del agua. Todos estos problemas no se dan en general con maderas tratadas con los preservantes de base acuosa aplicados bajo presión.

Por otro lado, un beneficio importante del aceite de los preservantes es que inherentemente repele al agua, lo que reduce la descomposición y previene la congelación en climas muy fríos. Los aceites también lubrican la madera, manteniéndola suave y flexible, evitando rajaduras y que se parta. Otra ventaja es que los elementos metálicos en contacto con la madera tratada no se corroen cuando se emplean preservantes a base de aceite. Por último, los postes de servicios públicos sobreviven mejor a los incendios cuando se emplean preservantes al aceite en lugar de los de base acuosa.

Si bien el aceite en los preservantes repele el agua, en contacto con ésta hay más lixiviación que en el CCA-C por la fijación de éste a la madera. Por tal razón, en suelos húmedos o con napa próxima a la superficie, se prefieren postes tratados con CCA-C frente a los tratados con PCP o creosota. Otros preservantes de base acuosa también se fijan a la madera, pero por ser

relativamente nuevos no hay suficientes datos para establecer su tasa de lixiviación. Tampoco se sabe cómo esto afecta la vida útil de la madera.

Uno de los criterios más importantes en cualquier sistema de preservación de madera, en especial para postes de servicios públicos, es contar con un historial de confiabilidad del sistema seleccionado. Esto permite a los encargados del servicio estimar la durabilidad y establecer un plan de reposición. Desde este punto de vista, los preservantes en base a aceite históricos PCP y creosota han demostrado no sólo longevidad en campo, sino también un desempeño consistente y confiable por 70 a 80 años, respectivamente. De los preservantes de base aceite, en ensayos el PCP es el que ha mostrado la vida útil estimada más extensa, comparada con la creosota y el CuN.

Algo similar a los postes tratados con PCP y creosota puede decirse de los tratados con CCA-C, que en USA se emplean desde principios de los '40, con una vida útil que se estima supera la del preservante análogo ACZA. La mayoría de los preservantes de base acuosa alternativos se estandarizaron hace relativamente poco (p.ej. 1995 en adelante), por lo que no hay un registro probado suficientemente extenso de servicio.

El CuN en base aceite merece una mención aparte, ya que, a pesar de las ya mencionadas ventajas para un desempeño similar, no tiene una demanda de mercado comparable a los otros preservantes en base aceite. Esto podría estar asociado a un historial de fallas tempranas de los postes tratados con CuN, algo que en la actualidad ha sido resuelto, alcanzando una tasa de fallo equivalente a la de postes tratados con PCP.

Con respecto a la efectividad para el control de agentes biológicos, cuando son prevalentes los hongos tolerantes al cobre, los tratamientos con creosota o PCP es más probable que sean efectivos que el CuN en base a aceite. CCA-C, ACZA y creosota son los preservantes empleados para tratar pilares de madera en ambientes marinos. No obstante, la creosota no protege al menos frente a una especie marina de organismo perforante denominado *Limnoria tripunctata*. Si bien su distribución principal es en el hemisferio norte, hay referencias de su presencia en el Atlántico Sur.^{[1161](#)}

6.1.4 ESTUDIOS DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (LCA)

A continuación, se resumen las conclusiones principales de tres estudios de LCA que comparan los impactos ambientales generados por el empleo de diferentes materiales constructivos en estructuras civiles (puentes o postes). Cuando el material es madera, se especifica el preservante utilizado, y en el caso de puentes se evalúan dos sub-escenarios correspondientes a dos preservantes distintos. Los estudios surgen de una búsqueda bibliográfica de estudios de LCA que evalúen preservantes de madera, aquí limitada a preservantes históricos (CCA, creosota, PCP). Si bien las conclusiones de estos estudios pueden dar una idea de la magnitud relativa de los impactos, no pueden directamente asumirse como válidas para las condiciones locales. Esto último requiere un análisis detallado de los escenarios evaluados en los estudios

publicados y, en último término, replicarlo para un inventario y factores de emisión ajustados a la realidad local.

Caso 1.^[17] LCA de los puentes de madera contruidos con madera impregnada de creosota y CCA, comparados con los de puentes de hormigón y acero. Las conclusiones obtenidas fueron las siguientes: 1) Los puentes de madera (creosota y ACC) son escenarios más ventajosos para el cambio climático, la formación de foto oxidantes, la acidificación y la eutrofización. Sin embargo, el puente de madera (CCA) es un escenario desventajoso para la toxicidad humana y la ecotoxicidad; 2) La razón principal de la desventaja del puente de madera (CCA) son las descargas de As, Cr y Cu al medio ambiente durante el servicio y cuando se incinera la madera impregnada de CCA; 3) Se puede lograr una reducción efectiva de los impactos tóxicos de la madera impregnada de CCA mediante la recolección de los componentes de CCA en el sitio de incineración.

Caso 2.^[18] LCA siguiendo las normas ISO 14044 para una evaluación cuantitativa de los impactos ambientales asociados con la producción, uso y disposición nacional de postes de servicios públicos, comparando los siguientes materiales constructivos: concreto, acero galvanizado, madera tratada con arseniato de cobre cromado (CCA) y material compuesto reforzado con fibras.

Los resultados muestran que los postes de servicios públicos tratados con CCA, en la comparación con los otros materiales evaluados, presentan los indicadores con los valores más bajos para todas las categorías de impacto evaluadas, excepto para el consumo del recurso agua, donde el acero tiene un valor un 10% menor. Las otras categorías de impacto fueron emisiones antropogénicas de GEI, uso de combustibles fósiles y de energía total, uso de agua, lluvia ácida, smog, eutrofización y ecotoxicidad.

Además de los resultados anteriores, si se considera el efecto neto en las emisiones de GEI, se observa que el uso de postes tratados con CCA reduce los gases de efecto invernadero por secuestro de carbono en la madera. Esto se refleja en un valor negativo del indicador, en contraste con las emisiones netas positivas asociadas al uso de los otros materiales, que aumentan el nivel de CO₂ en la atmósfera.

Por último, el estudio contempló la posibilidad de la reutilización de los postes de servicios públicos tratados con CCA para la recuperación de energía en instalaciones habilitadas para combustión de residuos peligrosos, esto es, con controles de emisiones adecuados. Este escenario reduciría aún más los niveles de GEI en la atmósfera, al tiempo que compensaría el uso de energía de combustibles fósiles.

Caso 3.^[19] LCA contemplando todo el ciclo de vida para identificar los impactos ambientales relacionados con postes de madera tratados con PCP, comparándolos con postes de dos materiales alternativos: concreto y acero.

Los resultados del estudio mostraron valores de los indicadores de impacto de GEI, uso de combustibles fósiles, acidificación, uso de agua y toxicidad ecológica para los postes tratados con PCP son menores que para los postes de

concreto y los de acero. Por el contrario, los impactos del smog para los de acero y los de concreto son menores que para los postes de madera tratados con PCP. Por último, los valores para el indicador de eutrofización son aproximadamente iguales para el acero y la madera tratada con PCP, en tanto éstos son menores que para el concreto.

En las Figura 9 y Figura 10 se muestran de forma gráfica los resultados de los estudios de caso B y C. Los estudios fueron publicados por el mismo equipo de trabajo, por lo que es posible consolidar los resultados cuando, para determinado impacto, en ambos estudios coincide el material con el valor máximo para dicho impacto. Para los impactos en smog y uso de agua esto último no ocurre, por lo que se presentan en el segundo gráfico por separado.

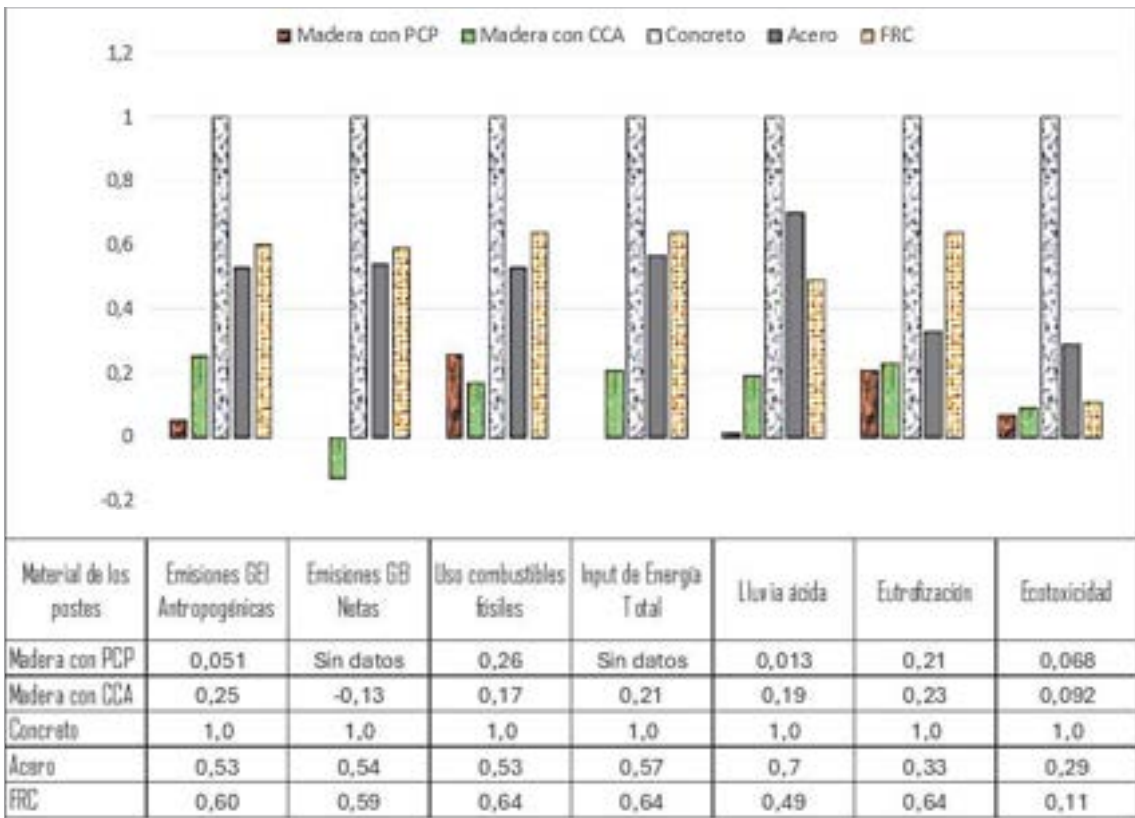


Figura 9. Comparación de indicadores de impacto (normalizado a máximo = 1,0). Casos A y B consolidados

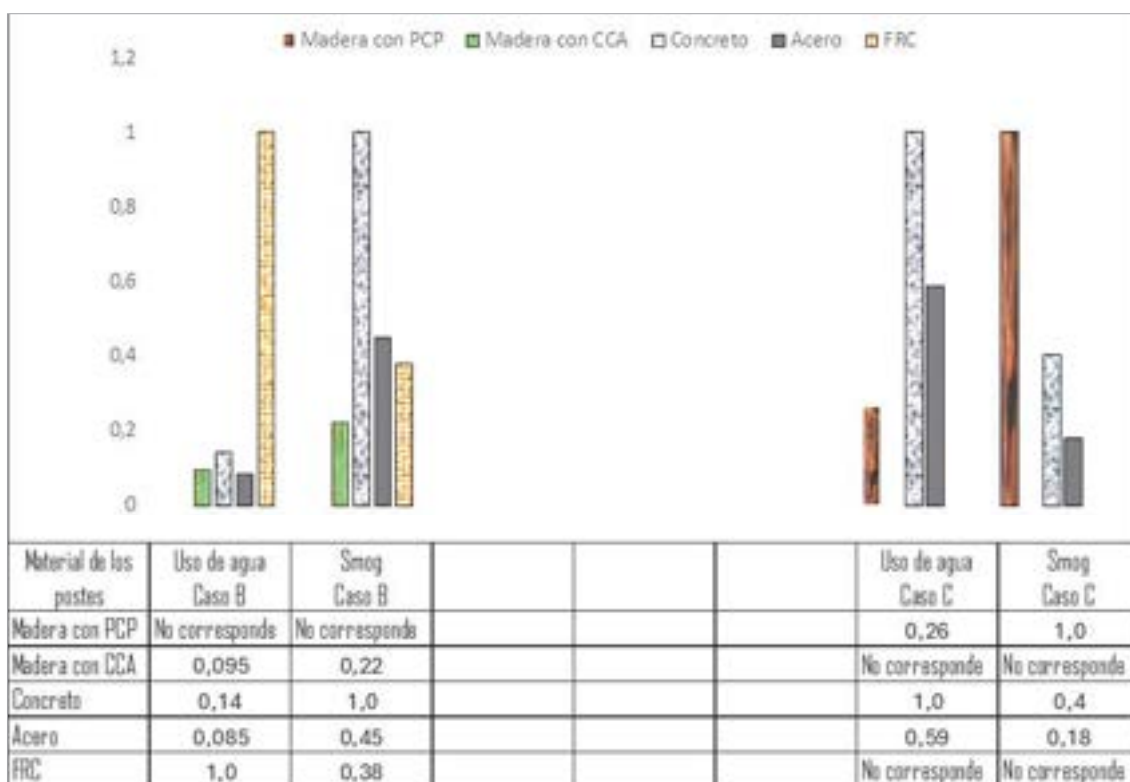


Figura 10. Comparación de indicadores de impacto (normalizado a máximo = 1,0). Casos B y C por separado

6.1.5 PRESERVANTES DE SEGUNDA GENERACIÓN BASADOS EN COBRE

El volumen de productos de madera tratados con preservantes basados en cobre creció exponencialmente en las décadas del 70 y 80, un uso que permanece alto hoy en día. La tendencia aumentó a partir de las preocupaciones acerca de los efectos ambientales del cromo y el arsénico, que resultaron en crecientes restricciones para el uso del CCA. Estas alternativas al CCA se centran en el cobre como el principal principio activo, pero incluyen en lugar de cromo y arsénico co-biocidas inorgánicos u orgánicos, como amonios cuaternarios y azoles.

Las formulaciones basadas en cobre pueden clasificarse de la siguiente forma:^[20]

- Formulaciones de cobre solubles en agua: p.ej. CCA, ACZA, ACC, ACQ, CA, CX-A
- Complejos de cobre en base aceite: p.ej. CuN, oxina de cobre
- Formulaciones de base acuosa de cobre micronizado

En la sección de preservantes históricos ya se relevaron los preservantes con cobre CCA, ACC, ACZA y CuN (o CuNap), por lo que no se vuelven a tratar aquí. Tampoco se trata el CDDC (bis dimetilditiocarbamato de cobre) porque ha dejado de emplearse, debido al costo de convertir las plantas para su uso y del proceso de tratamiento en dos etapas.¹⁰²

Toxicidad del cobre

Las consideraciones ya realizadas sobre la toxicidad humana y ambiental del cobre en la evaluación del CuN son en general válidas para todos los preservantes en base a cobre de este grupo. Si bien las aplicaciones donde se emplean éstos pueden diferir de las aplicaciones del CuN, una evaluación del riesgo a la salud humana por exposición a madera tratada con ACQ concluyó que todas las estimaciones de exposición estaban bien por debajo de los límites máximos establecidos.^[21] La reducción en el riesgo a la salud por no utilizar arsénico ni cromo tiene como contracara el problema de los hongos tolerantes al cobre (que el arsénico evita) y la posible mayor corrosividad hacia partes metálicas en contacto.^[22]

La toxicidad acuática es la principal desventaja ambiental para el uso de estos preservantes de segunda generación basados en cobre. Las diferencias que tengan las distintas formulaciones para fijar el cobre a la madera tratada serán entonces críticas para el potencial impacto que tengan por la liberación al ambiente de iones de cobre. Como ocurre con el CCA, en general no hay suficiente información para evaluar efectos sinérgicos del cobre con los otros componentes de la formulación, en particular con los co-biocidas.

A pesar de esto último, es posible prever algunas interacciones entre componentes. Por ejemplo, la toxicidad del cobre puede ser suprimida o limitada por su disponibilidad biológica a través de la formación de complejos o precipitación con proteínas o agentes quelantes de metales, p.ej. EDTA. La toxicidad del cobre puede reducirse en algunas especies de hongos tolerantes al cobre en presencia de una fuente de nitrógeno, como sería al incrementar el amoníaco en el cobre alcalino cuaternario (ACQ). La reducción se atribuye a la estimulación de la producción de ácido oxálico^[23] por el hongo, que inmoviliza el cobre precipitándolo como cristales de oxalato de cobre.

6.1.5.1 COBRE ALCALINO CUATERNARIO (ACQ)

Las variaciones del amonio cuaternario alcalino de cobre (ACQ) incluyen los Tipos A, B, C y D, que difieren en la relación de CuO al compuesto co-biocida de amonio cuaternario (1:1 o 2:1), el tipo de compuesto cuaternario utilizado, y el sistema de solvente empleado. Los tipos A, B y D usan como co-biocida el cloruro o carbonato de didecildimetilamonio (DDAC o DDA-Carb), en tanto el ACQ-C usa cloruro de alquilbencildimetil amonio (ADBAC). Las formulaciones pueden emplear solventes en base a amoníaco, aminas (p.ej. monoetanolamina) o mezclas.^[24]

Toxicidad de amonios cuaternarios

La evaluación de la toxicidad de esta sección contempla los distintos grupos de compuestos de amonio cuaternario (en inglés abreviados como "Quats") Quats, basados en información de U.S. EPA^[25], que toma como compuesto modelo el DDAC, el primero registrado en USA (en 1962).

U.S. EPA evaluó el **riesgo de exposición ocupacional** en el uso de *quats* para preservación de madera, ya sea por métodos de tratamiento con y sin presión, tanto en la manipulación del producto como en escenarios post - aplicación. U.S. EPA sólo presenta las exposiciones y los riesgos por inhalación. Esto se debe a que las irritaciones dérmicas provocadas en actividades posteriores a la aplicación (realizadas en las instalaciones de tratamiento de conservación de la madera) se mitigan utilizando los equipos de protección personal predeterminados, acorde a la toxicidad del producto que fue tratado.

Para **tratamientos no presurizados**, se identificaron funciones o cargos de operarios que pueden exponerse por contacto directo con el preservante (manipuladores) o por contacto con la madera preservada, como se indica en los siguientes párrafos.

a. Manipuladores de preservantes

- Los **operadores de mezcladores/pulverizadores** son trabajadores que agregan el conservante de madera a un sistema mezclador/pulverizador para madera compuesta, mediante bombeo en circuito líquido cerrado.
- Los **operadores de tanques de inmersión** hacen referencia a la madera que se sumerge en la solución de tratamiento a través de un proceso automatizado (es decir, tanques de inmersión con elevadores, tanques de inmersión con montacargas). Este escenario también puede ocurrir en una instalación de tratamiento de menor escala en la que el trabajador puede sumergir manualmente la madera en la solución de tratamiento.
- Los **operadores químicos** (asistentes, supervisores, capitanes) para el sistema de cajas de pulverización son personas que mantienen un equilibrio en el suministro de productos químicos junto con el lavado y la limpieza de las boquillas de pulverización.

b. Contacto post – aplicación

- Los **clasificadores**, ubicados justo después de la caja de pulverización, clasifican la madera seca a mano (es decir, detectan fallas).
- Los **mecánicos de aserradero** reparan todas las cadenas transportadoras y realizan el mantenimiento general del aserradero.
- El **personal de limpieza** realizan tareas generales de limpieza en el aserradero.
- Los **operadores de la sierra de corte** comprende a operadores y flejadores.
- Los **trabajadores de la construcción** instalan madera contrachapada tratada, tableros de virutas orientadas (OSB), tableros de fibra de densidad media y otros.

De todas las exposiciones por inhalación evaluadas para las funciones y cargos anteriores, solamente los operadores de mezcladores / pulverizadores no alcanzan el margen de exposición (MOE) mínimo de 100 (MOE=84 sin EPP respiratorio). En la gran mayoría de los restantes casos, el MOE > 1000.

Para **tratamientos presurizados** las exposiciones y riesgos por inhalación estimados para **operador de tratamiento, asistente de tratamiento y personal**

con otras funciones (operadores de tranvía, carga y apilado, supervisor, calador de muestras, etc.) el MOE supera holgadamente el mínimo de 100 (>1000).

En cuanto al **riesgo de incidentes** asociados con la exposición a productos de uso final conteniendo *quats*, entre todas las agencias de USA con competencia en el tema, durante el período 1982-2004 se registraron 2700 incidentes (no exclusivamente en tratamiento de madera). La mayoría de éstos se relacionaban a irritación dérmica, por inhalación y, mayormente, ocular.

Los **riesgos para la población general** por exposición a los *quats* a través de la dieta, la aplicación no profesional o por contacto, no están asociados de forma significativa a su uso para tratamiento de madera, sino a su uso como desinfectante de alimentos, superficies y textiles.

Con respecto a los **riesgos ambientales** por el uso de *quats* en tratamientos de madera contra las manchas provocadas por hongos, en base a las evaluaciones realizadas para ADBAC no se espera que las especies animales terrestres se vean directamente afectadas por este uso. En función de los niveles umbral de alarma relativamente altos, tampoco se espera que las especies acuáticas no objetivo (peces, invertebrados, algas verdes), ya sea amenazadas o no, estén en riesgo agudo o crónico.

Por otra parte, a menos que se utilicen métodos para evitar la escorrentía desde los sitios de tratamiento con *quats* (por ejemplo, métodos como almacenar la madera tratada en interiores, cubrir la madera tratada y utilizar bermas o barreras de plástico en áreas de almacenamiento al aire libre), los invertebrados acuáticos marinos y de agua dulce pueden estar en riesgo. Afortunadamente, dado que los *quats* en general se adsorben firmemente a la arcilla y a la materia orgánica, se reduce en gran medida el potencial de que se filtren hacia abajo a través del suelo hasta las aguas subterráneas, o se muevan con la escorrentía superficial hacia cuerpos de agua.

6.1.5.2 AZOLES DE COBRE (CA)

Los azoles de cobre son formulaciones de preservantes de base acuosa que protegen a la madera tanto de la descomposición por hongos como del ataque de insectos, principalmente por la acción de amina de cobre y uno o más co-biocidas. Al menos uno de éstos siempre es un azol, compuesto heterocíclico aromático fungicida, con uno o más átomos de nitrógeno.^[26] La primera formulación desarrollada fue el azol de cobre **tipo A (CBA-A)**, que contiene 49% de cobre, 49% de ácido bórico y 2% de tebuconazol. La formulación de azol de cobre **tipo B (CA-B)** no contiene ácido bórico: está constituida por 96% cobre y 4% tebuconazol. La formulación **tipo C (CA-C)** utiliza también 96% de cobre, pero 2% propiconazol y 2% tebuconazol (esta combinación de triazoles ha mostrado ser sinérgica)

Ya se hicieron consideraciones respecto a la toxicidad del cobre en otros preservantes. Los riesgos de exposición al bórico se ven más adelante, con los preservantes en base a boratos. En las siguientes secciones se resumen los riesgos de exposición asociados a los triazoles tebuconazol y propiconazol,

específicamente en tratamiento de madera, según información publicada por U.S. EPA.^{[27] [28]}

6.1.5.2.1 TEBUCONAZOL

U.S. EPA evaluó los **riesgos de exposición ocupacional** al tebuconazol para **tratamientos de madera presurizados** y, si bien se prevé que se produzcan exposiciones dérmicas y por inhalación a corto, mediano y largo plazo durante esta actividad, los márgenes de exposición (MOE) exceden el nivel de alerta (LOC = 100) para ambas vías de exposición.

En **tratamientos de madera no presurizados** (por inmersión o aerosol), no se esperan escenarios con riesgo que estén en el nivel de alerta (MOE < 100), excepto para los operarios responsables de la limpieza, tanto por inhalación (MOE = 38) como por vía dérmica (MOE = 26). Estas situaciones se resuelven empleando equipo de protección respiratoria y limitando la concentración de tebuconazol en la solución de tratamiento a 1,25%.

No se prevén exposiciones ocupacionales por inhalación o por vía dérmica **posteriores a la aplicación** para los usos previstos del tebuconazol en función de las propiedades fisicoquímicas y los patrones de uso registrados. El tebuconazol tiene una presión de vapor baja que impide la exposición por inhalación a los vapores en áreas que contienen materiales conservados con tebuconazol. Además, el tebuconazol no se aplica mediante métodos como la nebulización, que daría lugar a la generación de pequeñas gotas que permanecen en el aire durante largos períodos después de la aplicación.

De los potenciales **riesgos de exposición de la población en general**, no está previsto que ocurra a través de la dieta y tampoco a través de la manipulación residencial no profesional del preservante de madera. Existe la posibilidad de exposición dérmica y oral incidental a corto y mediano plazo cuando los niños juegan en terrazas y juegos contruidos con madera que ha sido tratada a presión con tebuconazol. Los márgenes de exposición (MOE) no son motivo de preocupación están por debajo del nivel de alerta (LOC = 100) para ambas vías de exposición.

En cuanto a los **riesgos ambientales**, no se esperan riesgos para los **organismos terrestres** (incluidos los polinizadores) a partir de los usos registrados actualmente de tebuconazol, debido al bajo potencial de exposición. Para los usos como conservante de la madera, con base en la tasa de lixiviación del 3,1% y la ausencia de degradación de tebuconazol, las estimaciones de exposición para **organismos acuáticos** no alcanzaron los niveles de preocupación para las plantas acuáticas (vasculares y no vasculares), los invertebrados de agua dulce (agudo y crónico) o los peces de agua dulce (agudo); por lo tanto, no se esperan estos riesgos. Sin embargo, se espera riesgo por exposición crónica a peces de agua dulce, peces marinos/estuarinos, invertebrados marinos/estuarinos (columna de agua) e invertebrados bentónicos de agua dulce cuando se utiliza tebuconazol como conservante de madera en muelles.^[29]

6.1.5.2.2 PROPICONAZOL

En **riesgos de exposición ocupacional**, para los operarios de **tratamientos de madera no presurizados**^[30] que usan guantes, los márgenes de exposición (MOE) combinados a corto plazo y a mediano plazo varían en rangos que siempre superan el nivel de alerta o preocupación (LOC = 100). En el caso de los operarios de **tratamientos de madera presurizados**, el MOE combinado a corto plazo está en un rango por encima de LOC = 100, pero el extremo inferior del rango del MOE dérmico (con guantes) y por inhalación combinado a medio plazo (86 – 730) es menor que el LOC = 100. Este valor se encuentra dentro del rango de riesgo insignificante, lo que, sumado a la incertidumbre en la estimación de la exposición, no justifica medidas de mitigación. No obstante, U.S. EPA indicó monitorear la exposición de los operarios del tratamiento a presión de la madera con propiconazol para confirmar que el riesgo efectivamente no es significativo.

Los MOE de los trabajadores de los aserraderos que están expuestos a la madera después de que esta es tratada (**exposición post-aplicación**), ya sea dérmicos de corto plazo o por inhalación de corto y mediano plazo, están en rangos por encima de LOC = 100. Los MOE dérmicos de mediano plazo son preocupantes solo para un escenario: los trabajadores que realizan actividades de limpieza (MOE = 51). Sin embargo, por tratarse de una situación análoga a la del MOE = 86 del párrafo anterior, U.S. EPA cree que el riesgo para los trabajadores del equipo de limpieza es una sobreestimación y los riesgos no son preocupantes, pero también mandata un monitoreo confirmatorio.

En cuanto a los **riesgos de exposición de la población general**, ya sea aguda o crónica, a través de alimentos, agua bebible y de la exposición a madera tratada, U.S. EPA considera que no se precisan medidas de mitigación. Lo mismo aplica para la exposición agregada, que considera también los metabolitos producto de la degradación del propiconazol.^[31] De todas formas, U.S. EPA indica la realización de estudio de contaminación de superficie de madera tratada (*wipe study*) para confirmar que la exposición no es significativa.

Es importante destacar que las conclusiones sobre exposición humana al propiconazol del estudio de U.S. EPA de 2006 fueron ratificadas en la revisión de 2022.^[32] A pesar de que esta evaluación en USA concluyó que los riesgos para la salud humana están dentro de los rangos aceptables, Europa limitó los usos del propiconazol^[33] a partir de que el Comité de Evaluación de Riesgo (RAC) de la Agencia Europea de Químicos (ECHA) lo clasificó como Reprotox 1B (tóxico para reproducción) y lo evalúa como posible disruptor endócrino.^{[34] [35]}

Desde el punto de vista del **riesgo ambiental**, el documento de U.S. EPA²⁸ evalúa el riesgo ambiental para otros usos del propiconazol distintos al tratamiento de madera, si bien es de esperar una evaluación similar a la del tebuconazol por la similitud de la molécula. Por otra parte, ECHA concluyó que no hay riesgos inaceptables para el ambiente por el uso de productos biocidas conteniendo propiconazol en tratamiento de madera, cuando no se consideran las propiedades de disrupción endócrina, y cuando se aplican medidas de mitigación para limitar la exposición de las distintas especies en el ambiente. No hay conclusiones aún respecto al riesgo por efectos de disrupción endócrina.³³

6.1.5.3 XYLIGEN DE COBRE (CX-A) O COBRE-HDO (CU-HDO)

El CX-A o Cu-HDO (bis-[N-(ciclohexildiazeniodioxi)]-cobre; CAS 312600-89-8) es un preservante de madera de base acuosa, que también puede contener carbonato de cobre y ácido bórico como ingredientes activos. En esta sección se evalúa sólo el riesgo de exposición al Cu-HDO, en tanto el bórico se evalúa para los preservantes de borato.

Las conclusiones sobre las evaluaciones de riesgo a la salud y el ambiente que se resumen en esta sección provienen del informe de evaluación del producto comercial *Wolmanit CX*, generado para cumplimiento de la reglamentación UE N° 528/2012 sobre productos biocidas.^[36]

El **riesgo ocupacional**, evaluado para tratamiento de madera presión al vacío, incluyó la exposición primaria (directa al producto) y secundaria (post-aplicación, por contacto con madera tratada). La evaluación de **exposición primaria** se hizo en condiciones reales de una planta en Alemania, con operarios usando EPP (guantes de nitrilo y overol), por vía dérmica e inhalación. Si bien el producto concentrado es corrosivo para los ojos y la piel, las soluciones de trabajo son sólo irritantes. La **exposición ocupacional secundaria** incluye inhalación de polvo y exposición dérmica, aguda y crónica, durante el lijado de madera tratada con Cu-HDO, y la inhalación crónica de residuos volátiles en recintos cerrados.

El **riesgo de la población general** fue evaluado para un niño en los siguientes escenarios con madera tratada: exposición oral aguda por masticar un resto; crónica por inhalación de residuos volátiles en ambiente cerrado; crónica dérmica por jugar en estructuras de juegos al aire libre; crónica dérmica y oral por jugar en estructuras desgastadas y llevarse a la boca restos de éstas.

Todos los mencionados escenarios ocupacionales y de población general dieron como resultado una caracterización de riesgo aceptable de exposición a Cu-HDO. No obstante, un escenario adicional que considera que animales de granja mastican postes de las cercas de los potreros y luego esto genera una exposición alimentaria humana. Si bien este escenario dio como resultado un riesgo no aceptable, no está respaldado por datos, por lo que recomiendan evitar el contacto de madera tratada con ganado, a menos que se compruebe que no existe riesgo.

En la evaluación de **riesgos ambientales** no se identificaron riesgos por exposición directa para el compartimento aéreo, el compartimento acuático (plantas de tratamiento de aguas residuales, aguas superficiales) y para las aguas subterráneas. Tampoco se identificaron riesgos por exposición secundaria a través de la cadena alimentaria. El riesgo calculado para el compartimento terrestre, para el suelo local debajo y alrededor de las áreas de almacenamiento dentro de los sitios de tratamiento industrial de la madera no es aceptable. Es necesario entonces reducir sustancialmente el riesgo a niveles aceptables controlando las emisiones del lugar de almacenamiento. Dentro de las medidas de mitigación propuestas está restringir el almacenamiento de madera tratada industrialmente a áreas bajo techo y/o sobre superficies duras

impermeables para evitar pérdidas directas al suelo, así como permitir la recuperación de las pérdidas para su reciclaje o eliminación adecuada.

La evaluación de *Wolmanit CX* incluye no sólo la fase de uso del producto, sino también **exposiciones en otras partes de su ciclo de vida**, como su fabricación y la disposición final de la madera tratada. Se considera que la fabricación del Cu-HDO es un proceso completamente automatizado y en circuito cerrado, lo que excluye prácticamente la exposición a operarios y al ambiente. Los residuos de madera tratada se consideran residuos peligrosos, y como tal deben disponerse.

6.1.5.4 FORMULACIONES DE COBRE MICRONIZADO (MCA Y MCQ)

En estas formulaciones partículas “micronizadas” de compuestos de cobre (MC) se dispersan en un *carrier* en lugar de usar cobre disuelto. Las partículas pueden estar en el rango de 1 a 25.000 nm, obtenidas por molienda mecánica o por medios químicos, a partir de cualquier fuente adecuada de cobre, aunque el carbonato básico de cobre es el más comúnmente usado. La formulación contiene componentes no-biocidas agregados para mejorar el desempeño, que pueden incluir repelentes de agua, agentes para solubilizar, inhibidores UV y estabilizadores dimensionales de la madera. El cobre micronizado puede mezclarse también con insecticidas, en tanto los **co-fungicidas preferidos son los quats (MCQ) y triazoles (MCA)**.

La evaluación de riesgo por exposición a los co-formulantes no se aborda en esta instancia (como en ninguna de las otras formulaciones), porque en general no implican riesgos significativos frente a los de los principios activos, y porque es un grupo más numeroso y variable, del cual los fabricantes no suelen brindar suficiente información. Los riesgos asociados a otros principios activos que integran la formulación con el MC (insecticidas y triazoles) ya se abordaron en otras secciones del informe. También ya se evaluó el riesgo asociado al cobre soluble, por lo que esta sección se enfoca en las potenciales diferencias de riesgo por emplear el sólido micronizado o **nanopartículas de cobre (Cu-NPs)** respecto al empleo de cobre soluble.

La U.S. EPA^[39] comparó la liberación de cobre de madera tratada a presión (PTL) con formulaciones de azol de cobre micronizado (MCA) y PTL con azol de cobre (iónico) alcalino (ACA). Se evaluaron dos formulaciones MCA, una con gran cantidad de cobre complejoado orgánicamente (MCA-1) y otra donde la principal forma de partícula es carbonato de cobre (MCA-2). Los tamaños de partícula en MCA-1 son aproximadamente la mitad de los de MCA-2.

Los resultados del mencionado estudio de lixiviación de U.S. EPA indican que mayormente (>~95%) se libera cobre iónico de la madera tratada con MCA y que la fracción minoritaria (<~5%) del cobre liberado como partículas se encontraba ligado a celulosa y no libre en solución. Comparando la madera tratada con MCA respecto a la tratada con ACA, la de MCA libera significativamente menos cobre que la de ACA, lo que conduce a un impacto

potencial menor en el ambiente, a pesar de que ya ha sido demostrado que con ACA el impacto no es significativo.

Con respecto a la liberación por contacto de la mano con la madera (p.ej. para evaluar riesgo de niños jugando en terrazas o juegos al aire libre en madera tratada), se utilizaron *wipe tests*. En este caso los resultados mostraron que la madera tratada con MCA y con ACA liberan aproximadamente la misma cantidad de cobre con cada contacto, partiendo del valor inicial más alto y decreciendo hasta una meseta después de pasar 2-3 veces las toallitas (*wipes*). El valor de la meseta es más alto para madera expuesta a la intemperie, llevando a la conclusión de que la lluvia podría causar la migración de cobre a la superficie. La MCA-1 tuvo una liberación ligeramente mayor a la MCA-2, ya sea por el menor tamaño de partícula o la mayor concentración de cobre en complejos orgánicos.

Si bien el estudio no hace consideraciones respecto a otro tipo de formulaciones de MC, como los MCQ, parece razonable que las conclusiones puedan extenderse a éstos, a menos que la presencia de quats incida en el comportamiento del cobre micronizado.

El estudio de U.S. EPA favorecería entonces el uso de MC frente al cobre iónico, ya que concluye que el cobre total liberado en madera tratada con formulaciones de MCA es menos (para lixiviación) o comparable (por contacto de manos) que en madera tratada con las formulaciones de cobre iónico. No obstante, hay otras variables a considerar, en particular la toxicidad comparada del Cu-NP frente al cobre iónico, como también el comportamiento y transformaciones del Cu-NP en el ambiente. La evaluación de riesgo de las formulaciones de MC requiere la consideración de dichas variables, aunque, al menos en lixiviación, la fracción de cobre liberada en forma de Cu-NP es muy minoritaria.

En los siguientes puntos se resumen algunas conclusiones de publicaciones científicas que evidencian la necesidad de más estudios para comprender los posibles efectos de las Cu-NP en el ambiente y la salud humana.

- En la actualidad, no se han realizado investigaciones para verificar la exposición humana o ambiental a las nanopartículas a base de Cu provenientes de la madera tratada como una fuente potencial, por lo que es imposible predecir y estimar el riesgo de manera adecuada (Civardi et al., 2015).^[40]
- Los hallazgos indican que, en las condiciones experimentales elegidas, el MCA no plantea un nanorriesgo adicional específico, es decir, no hay liberación adicional de nanopartículas ni nanotoxicidad específica para las células epiteliales pulmonares y los macrófagos (Civardi et al., 2016).^[41]
- Los resultados de una investigación indican que los Cu-NPs representan una fuente de riesgo para las comunidades bentónicas marinas comparable a la del Cu disuelto (Ho et al., 2017).^[42]
- Al parecer, las Cu-NPs fueron más tóxicas que las de CuO, como lo demuestra la hematotoxicidad y hepatotoxicidad en *C. carpio* de este estudio (Noureen et al., 2018).^[43]

- En la actualidad, no se dispone de información adecuada sobre cómo las nanopartículas a base de Cu afectan a los organismos del suelo, por ejemplo, microbios, hongos, nematodos y lombrices de suelos de importancia agrícola. Las nanopartículas pueden afectar a la flora del suelo directamente al inducir cambios en la biodisponibilidad de otras toxinas y nutrientes o indirectamente a través de interacciones con compuestos orgánicos naturales, posibles interacciones con compuestos orgánicos tóxicos que pueden aumentar o disminuir la toxicidad de las nanopartículas (Rajput et al., 2019).^[44]
- Estos hallazgos sugieren que los polvos de lijado de MCA y CA-C son más bioactivos que el polvo de lijado del pino amarillo (grupo de especies que incluye al *P. taeda* y *P. elliotii*) sin tratar y, además, el polvo de lijado de MCA es más bioactivo en comparación con el polvo de lijado de CA-C. No se observaron efectos tóxicos crónicos entre todos los polvos de lijado estudiados (Sisler et al., 2019).^[45]
- Se plantea la hipótesis de que las nanopartículas de Cu y CuO pueden provocar una toxicidad diferencial en los organismos debido a alteraciones en la disolución de partículas y variaciones en la absorción por parte de los organismos. Las concentraciones reales de Cu disuelto liberado de las nanopartículas se compararon con controles de cobre iónico (CuCl_2) a las mismas concentraciones para determinar la contribución relativa del Cu particulado y disuelto en la absorción y toxicidad de los organismos. Descubrimos que ambas NPs tenían una mayor absorción en *D. magna* y pez cebra que las exposiciones iónicas equivalentes, lo que sugiere que ambas NPs son absorbidas por los organismos. Las exposiciones a Cu-NPs inhibieron significativamente la tasa de crecimiento de las algas, la supervivencia de *D. magna* y la eclosión del pez cebra, mientras que la exposición a concentraciones equivalentes de CuCl_2 (fracción de Cu disuelto) y las CuO-NPs no lo hizo. Esto indica que las propias Cu-NPs probablemente provocaron un mecanismo de toxicidad específico de las partículas para los organismos de prueba, o un efecto combinado del Cu iónico y las Cu-NPs (Wu et al., 2020).^[46]
- Los resultados de este estudio indican que el Cu en la madera tratada con $\mu\text{-Cu}$ se disuelve y migra al suelo adyacente y al agua principalmente en forma iónica (es decir, Cu^{2+}) y no como partículas de Cu de tamaño nanométrico. Se identificó una forma reducida de Cu (Cu_2S) en el suelo profundo próximo a la madera tratada, lo que indica fuertes condiciones reductoras. La formación de Cu_2S insoluble elimina de manera efectiva una parte del Cu disuelto de la solución, lo que reduce el movimiento de Cu^{2+} a la columna de agua y disminuye la exposición (Johnson et al., 2021).^[47]
- Este estudio estimó los riesgos para la salud debido a dos tipos de nanoagroquímicos a base de cobre (nanopartículas (NP) de $\text{Cu}(\text{OH})_2$ y CuO) durante la ingestión inadvertida de suelo y el consumo de vegetales de hoja para un escenario de exposición hipotético. / Los valores máximos permisibles calculados de concentración aplicable de nanopartículas de $\text{Cu}(\text{OH})_2$ y CuO para que no representen un riesgo de toxicidad para humanos y plantas fueron 1,14 y 0,45 mg/L, respectivamente. Estos hallazgos

se pueden utilizar ahora para decidir el uso seguro de nanoagroquímicos a base de cobre (Shahane et al., 2021).^[48]

- En nuestra evaluación integral de los impactos ambientales y biológicos de los nanomateriales a base de cobre, debemos destacar la importancia de la especiación química y los distintos perfiles de toxicidad de varios compuestos de cobre. / Por último, no se comprenden completamente los impactos ambientales a largo plazo de las Cu-NPs en los ecosistemas del suelo y en los organismos no objetivo. El uso continuo puede provocar una acumulación en el suelo, lo que afecta a su calidad. Además, se requieren más estudios para comprender los efectos potenciales de las Cu-NPs en presencia de otros contaminantes o combinadas con factores de estrés abióticos ambientales (Tortella et al., 2024).^[49]

6.1.6 PRESERVANTES DE SEGUNDA GENERACIÓN BASADOS EN CARBONO

Como se explicó anteriormente estos preservantes pueden emplearse aislados o combinados, en mezclas con fungicidas e insecticidas.

Dentro de los fungicidas se emplean triazoles (tebuconazol, propiconazol, triadimefon), isotiazolinonas (DCOIT, OIT, MIT, CMIT), benzimidazoles (tiabendazol), benzotiazoles (2-MBT, TCMTB), carbamatos (IPBC) y nitrilos (clorotalonil), en tanto que dentro de los insecticidas se usan neonicotinoides (imidacloprid, tiametoxtam) o piretroides (bifentrina, permetrina). El PXTS, mezcla oligomérica de polisulfuros de alquilfenol, también puede considerarse dentro de este grupo. El preservante conocido como **EL2** es una mezcla de DCOIT (2,5%) con imidacloprid (0,05%), por lo que la evaluación de riesgo de su uso se aborda con la de sus componentes. El **flupronil** no suele aplicarse directamente en madera, salvo para tratamientos curativos y generalmente por inyección, sino que se aplica en suelos o estructuras adyacentes, por lo que no se considera en estas evaluaciones.

6.1.6.1 PTI

PTI significa propiconazol (fungicida), tebuconazol (fungicida) e imidacloprid (insecticida). Esta combinación es relativamente nueva, aunque se ha usado desde hace unos 20 años para tratamientos a presión de madera, actualmente limitado para usos sobre el suelo, como terrazas. En la evaluación de riesgo de los azoles de cobre ya se resumieron los riesgos asociados al uso de los triazoles fungicidas propiconazol y tebuconazol, por lo que en esta sección se resume solamente para el imidacloprid, mayormente basándose en la evaluación de riesgo a la salud realizado por U.S. EPA^[50] y otros documentos disponibles en el sitio de expedientes de imidacloprid de U.S. EPA.^[51]

6.1.6.2 OXINA-COBRE (CU-8)

La oxina de cobre (8-hidroxiquinoleína de cobre) se forma por la reacción de cobre con el 8-quinolinol y se usa desde la década de 1950. Puede disolverse en solventes de hidrocarburos, pero brinda protección más prolongada cuando se suministra en petróleo pesado y, si bien existe una forma soluble en agua a partir de ácido dodecil-bencensulfónico, dicha formulación corroe los

metales.^[37] Las conclusiones de las evaluaciones de riesgo a la salud y el ambiente que se resumen en esta sección provienen del informe de U.S. EPA de la revisión del registro del producto en 2021.^[38]

El **riesgo ocupacional** potencial por exposición dérmica y por inhalación para los operarios que manipulan oxina-cobre (**exposición primaria**) como parte del tratamiento preservante de madera (tratamiento a presión, tratamiento no presurizado o control de manchas de hongos) puede ser de corto, intermedio o largo plazo. Para los escenarios evaluados no se identificaron riesgos inaceptables, ya que los márgenes de exposición MOE son mayores que los correspondientes niveles de alerta: LOC = 100 para dérmico y LOC = 1.000 para inhalación. No se prevén escenarios post-aplicación (**exposición secundaria**) de riesgo, por la baja presión de vapor del oxina-cobre (que excluye escenarios riesgosos de inhalación de vapores en áreas con madera tratada) y a que no se emplean métodos de aplicación como nebulización, que mantengan gotas finas en suspensión en el ambiente por mucho tiempo después de la aplicación.

Los **riesgos de la población general** por exposición a oxina-cobre por vía oral (riesgo dietético) se mantuvieron para todas las subpoblaciones por debajo del 2,1% de las dosis de referencia (RfD). Los escenarios consideran las subpoblaciones más sensibles (niños <1 – 5 años), expuestos a través de la ingesta de agua y por llevarse a la boca las manos en contacto con cunas de madera tratada. Para exposiciones por vía dérmica y oral incidental, los escenarios residenciales post-aplicación considerados (no se consideran aquí aplicaciones residenciales) son de niños jugando al aire libre en terrazas y juegos de madera tratada, o incidentalmente llevarse a la boca un resto de madera tratada. No se identificaron riesgos inaceptables, ya que los márgenes de exposición MOE son en todos los casos mayores que los correspondientes niveles de alerta: LOC = 100 para dérmico y LOC = 100 para ingesta incidental.

En cuanto a los **riesgos ambientales**, en general no se prevén riesgos para los **organismos terrestres** (incluidos los polinizadores) a partir de los usos de tratamiento de madera registrados actualmente del oxina-cobre, debido al bajo potencial de exposición.

Las **especies acuáticas** están potencialmente expuestas a la oxina-cobre en su uso asociado a tratamiento de madera. Esta evaluación de riesgo de exposición ambiental se centra en los riesgos de su uso como preservante de madera en muelles a 25.000 ppm (2,5%) p.a. Otros usos del oxina-cobre, como la preservación de estructuras de madera al aire libre, ya sea por impregnación o tratamiento superficial, pueden también tener el potencial de generar exposición ambiental en especies acuáticas. Sin embargo, se determinó que el uso en madera de muelles da como resultado la mayor exposición de las especies acuáticas, debido a su lixiviación directa en áreas acuáticas.

Con respecto al uso como preservante en **madera de muelles en cuerpos de agua dulce**, uno de los modelos que estima la concentración en agua del preservante demuestra que, si se colocan menos de 5 muelles⁸⁰ en un solo hábitat acuático, no se identifica ningún riesgo para las especies acuáticas. En base a los supuestos de evaluación de riesgos actuales, que incluyen datos de

tasa de lixiviación específicos del oxina-cobre, los riesgos comienzan a ser motivo de preocupación para las plantas no vasculares (algas) con 5 muelles tratados, para peces de agua dulce (crónicos) con 6 muelles tratados, peces de agua dulce (agudos) con 9 muelles, para plantas vasculares (macrófitas) con 104 muelles tratados y para invertebrados de agua dulce (agudos) con 167 muelles tratados. Si bien es poco probable que se instalen más de 100 muelles en un mismo cuerpo de agua de 20.000 m³ (1 hectárea), la instalación de 5 a 9 muelles es razonable. Por lo tanto, para su uso como preservante de madera, los riesgos son preocupantes para las plantas acuáticas no vasculares y los peces de agua dulce (agudos y crónicos), pero no para las plantas acuáticas vasculares y los invertebrados de agua dulce (solo agudos, no se puede concluir para crónicos porque no hay un punto final disponible).

Si bien los cálculos de riesgo para los preservantes de madera sólo son apropiados para los organismos de agua dulce (porque los cálculos suponen un cuerpo de agua dulce), se esperaría que el riesgo para los peces e invertebrados de **muelles estuarinos/marinos** de madera tratada con oxina-cobre sea similar al de las plantas vasculares, en función de la magnitud de los puntos finales de toxicidad. Por lo tanto, no se anticipan riesgos para los peces e invertebrados estuarinos/marinos por el uso de oxina-cobre como preservante de madera.

No hay datos de ecotoxicidad disponibles para los **invertebrados bentónicos**. Sin embargo, en función de la adsorción y persistencia del oxina-cobre en suelo y sedimentos, es posible que se produzca exposición tanto al oxina-cobre como a sus productos de degradación. Por lo tanto, se presume que el uso del oxina-cobre como preservante de la madera en muelles supone un riesgo para los organismos bentónicos.

6.1.6.3 NEONICOTENOIDES

6.1.6.3.1 IMIDACLOPRID

La evaluación de riesgos a la salud que U.S. EPA realizó para el imidacloprid se centra en otros sus usos (mayoritariamente agrícolas) de dicho insecticida, con pocas referencias a su empleo residencial para tratamiento superficial de madera y sólo una mención al tratamiento presurizado de madera, con la tasa máxima a aplicar (0,0049 lb_{p.a.}/ft³ = 78 g_{p.a.}/m³ de madera).⁵⁰ A falta de información específica, los **riesgos de exposición ocupacional** podrían estimarse a partir de los datos de riesgo de exposición al tebuconazol para **tratamientos de madera presurizados**.^[52] Una de las primeras formulaciones PTI disponibles comercialmente fue la Wolman® AG en 2006, con una relación de concentración entre tebuconazol, propiconazol e imidacloprid de 10:10:1.^[53] El registro de Wolman® AG en U.S. EPA^[54] indica concentraciones de 5,0%, 5,0% y 0,5%, respectivamente, con un rango de concentración de uso del imidacloprid entre 0,0005% y 0,005%. Los niveles de exposición sistémica aceptable para operarios (AAOEL) del imidacloprid y del tebuconazol son 0,08 y 0,03 mg·kg⁻¹_{p.c.}·d⁻¹, respectivamente. Esto indica que el tebuconazol es para los humanos más del doble de tóxico que el imidacloprid. Las otras dos características de la sustancia que inciden en la exposición laboral, para una misma forma de

manipulación, son la penetración dérmica (0,3-0,8% vs 13%) y la presión de vapor ($4,0 \times 10^{-07}$ vs $1,30 \times 10^{-03}$ mPa a 20°C) de imidacloprid y tebuconazol, respectivamente.^[55]

Dado que el imidacloprid se maneja en la misma solución líquida que el tebuconazol (la del PTI), los factores de exposición en $\mu\text{g}/\%\text{p.a.}$ dérmicos son los mismos, pero el imidacloprid penetra menos por la piel. Por otra parte, el imidacloprid es menos volátil que el tebuconazol en varios órdenes de magnitud, por lo que la exposición por vía inhalación es también sustancialmente menor. Si los niveles de exposición laboral al tebuconazol en tratamientos presurizados para preservación de madera fueron evaluados por U.S. EPA como aceptables, incluso antes de corregir las concentraciones de principio activo usadas de 4,9% a 0,23%,⁵² es razonable que también sean aceptables para el imidacloprid, que se manipula a concentraciones menores y su toxicidad es menos de la mitad que la del tebuconazol.

Por las mismas razones mencionadas para las exposiciones ocupacionales por inhalación o por vía dérmica **posteriores a la aplicación**, no se prevén riesgos para éstos en el caso del imidacloprid.

De los potenciales **riesgos de exposición de la población en general**, para los que ocurren a través de la dieta los usos del imidacloprid en preservación de madera no son significativos frente a los usos agrícolas, y en cualquier caso están dentro de los riesgos aceptables. De todas las otras exposiciones residenciales al imidacloprid, que incluyen contacto con madera tratada e ingestas incidentales, las únicas que ameritan atención (contacto con collares de mascotas) no están vinculadas a preservantes de madera.⁵⁰

En cuanto a los **riesgos ambientales**, en julio de 2024 U.S. EPA anunció la disponibilidad de un borrador de evaluación de riesgos ecológicos del uso de varios pesticidas, entre ellos el imidacloprid, por lo que es de esperar información adicional en breve.^[56] Por lo pronto, el resumen ejecutivo de la evaluación actual de U.S. EPA^[57] no menciona la preservación de madera. Si bien ésta figura en la tabla del Apéndice 1-4 cantidades de imidacloprid empleadas en USA por tipo de uso,^[58] el volumen no está cuantificado, pero obviamente no es significativo frente a los usos agrícolas, con mucho mayor impacto ambiental potencial. La tabla sólo indica las tasas de aplicación: 78 $\text{g}_{\text{p.a.}}/\text{m}^3$ de madera tratada, 24 ppm en el agua de lavado a presión, 10% p.a. en baños de inmersión y aerosol.

En este caso, no es posible utilizar la evaluación de riesgo ambiental del tebuconazol para estimar el del imidacloprid, como se hizo para riesgo laboral. La razón para esto es que para tebuconazol se evaluó el riesgo ambiental de su uso en madera tratada para muelles, por tratarse del uso con mayor exposición por la lixiviación directa al medio acuático.⁵² El uso exclusivo del imidacloprid en ubicaciones terrestres (es decir, cercas, terrazas), determina que llegue a áreas acuáticas indirectamente después de pasar sobre el suelo y/u otro medio, un escenario no evaluado para el tebuconazol. Los modelos para exposición ambiental que desarrolla U.S. EPA para imidacloprid no contemplan actualmente los escenarios de lixiviación madera tratada. Contar con esto

último es relevante para comparar distintos tratamientos de preservación de madera, pero claramente no lo es en el impacto global del imidacloprid, dominado por su uso agrícola.

Las emisiones al ambiente durante el proceso de impregnación a presión pueden modelarse siguiendo el documento guía de OCDE (sección 4.2.3),^[59] emisiones que dependerán en gran medida de los sistemas de control que la planta disponga. Las opciones de control en general son menos aplicables para la lixiviación y volatilización desde estructuras de madera tratada.

El imidacloprid está clasificado como altamente tóxico en exposiciones agudas para los invertebrados acuáticos, entre los cuales los más sensibles son los insectos. Por comparación, los peces y plantas acuáticas son varios órdenes de magnitud menos sensibles. Para organismos terrestres, y también en exposiciones agudas, el imidacloprid se caracteriza por ser altamente tóxico para abejas, altamente tóxico para aves y moderadamente tóxico para mamíferos. Los datos disponibles sugieren efectos potenciales en colonias de abejas y otros polinizadores, lo que ha determinado priorizar los estudios en estos organismos.^[60] 57

6.1.6.3.2 TIAMETOXAM

El tiametoxam se registró como pesticida en USA por primera vez en 1999, en tanto en Europa las gestiones para su registro se iniciaron en 2008. En USA el registro incluía su uso como antimicrobiano en preservación de madera y estructuras de madera, en tanto que en Europa se solicitaba el registro como preservante de madera, para control de tres especies de termitas y del escarabajo de la carcoma grande.^{[61], [62]} No obstante, estos usos registrados fueron cancelados, en USA el 18 de setiembre de 2013⁶¹ y en el área económica europea (EEA) el registro también expiró.^[63] Probablemente esto se deba a que no resultaron eficaces las medidas de mitigación previstas para los impactos no aceptables identificados en las evaluaciones de riesgo y que otros preservantes alternativos tenían mejor costo beneficio.

Por no estar habilitado actualmente el uso del tiametoxam como preservante de madera tanto en Europa como en USA, no se desarrolla aquí los resultados de las evaluaciones de riesgo de U.S. EPA y Europa. De todas formas, pueden consultarse en las referencias citadas.

6.1.6.3.3 TRIADIMEFON

El triadimefon es un fungicida derivado del triazol, registrado por primera vez como preservante de madera en 2009.² U.S. EPA aprobó su uso para preservar productos de madera y compuestos a base de madera destinados a estar en contacto con el suelo y sobre el suelo. Es frecuente que se documente en conjunto con el **triadimenol**, un triazol que es el principal metabolito del triadimefon, pero que también está registrado como ingrediente activo, en ambos casos considerados por U.S. EPA para su uso en madera como antimicrobianos.^[64] Se considera que los efectos toxicológicos a la salud humana asociados a estos compuestos son los mismos, ya que tienen una estructura química, un perfil de toxicidad y un modo de acción plaguicida similar.^[65] Esto es consistente con los valores del mismo orden para el triadimefon

y triadimenol registradas en PPDB⁵⁵ para las dosis de referencia en exposición aguda (ARfD = 0,08 y 0,05 mg · kg⁻¹_{p.c.} · d⁻¹) e ingesta diaria admisible (ADI = 0,03 y 0,05 mg · kg⁻¹_{p.c.} · d⁻¹). No obstante, los valores para toxicidad crónica de U.S. EPA registrados en HHBP^[66] indican una toxicidad 10 veces mayor del triadimenol (RfD = 0,0043 mg · kg⁻¹_{p.c.} · d⁻¹).

Las evaluaciones de riesgo de U.S. EPA para uso del triadimefon han sido desarrolladas fundamentalmente para los usos mayoritarios, distintos a la preservación de madera, como el tratamiento de semillas y plántulas de pino, césped comercial o residencial, árboles ornamentales e inyección en árboles. Eso determina que U.S. EPA tenga disponibles conclusiones del riesgo por exposición a triadimefon como preservante de madera sólo para algunos escenarios.⁶⁴

Para la **evaluación de riesgo ocupacional** durante la aplicación de triadimefon en preservación de madera (mezcla/carga de polvos humectables para madera compuesta, tratamientos de manchas de albura por inmersión o pulverización, y tratamientos a presión), en 2016 U.S. EPA estaba a la espera de datos de asociaciones industriales para realizarlo, que incluiría el riesgo ocupacional post aplicación.⁶⁴

Para tratamientos a presión, con un enfoque similar al empleado para el imidacloprid, podría tenerse una estimación a partir de la evaluación de riesgo ocupacional del tebuconazol y la comparación de parámetros toxicológicos, fisicoquímicos y de concentración de uso con el triadimefon. Los parámetros son muy similares, iguales o más favorables al triadimefon: ARfD 0,02 mg · kg⁻¹_{p.c.} · d⁻¹⁵⁵, presión de vapor a 20°C 0,02 mPa,^[67] absorción dérmica 2,5-3,9%^[68],⁶⁵ vs 13%⁵⁵ y concentración de uso 0,25%^[69] vs 0,23%, para triadimefon y tebuconazol, respectivamente. U.S. EPA evaluó como aceptable el riesgo ocupacional de aplicación del tebuconazol⁵² y, en base a la comparación anterior, es razonable que también sea aceptable para el triadimefon.

La evaluación de **riesgo de la población general** de U.S. EPA⁶⁴ por exposición a triadimefon y su principal metabolito triadimenol concluye que no se espera que sus usos como preservante de madera resulten en exposición directa o indirecta significativa a dichas sustancias a través de la ingesta de alimentos o del agua bebible. La aplicación no profesional a nivel residencial no está en el alcance de este informe, pero en cualquier caso el citado documento de U.S. EPA indica que no es relevante. Por el contrario, en el documento U.S. EPA indica que es necesaria una evaluación de exposición residencial de niños, ya sea por contacto dérmico con madera tratada en terrazas y juegos de exteriores, como por ingesta incidental al llevarse las manos contaminadas a la boca. U.S. EPA estaba esperando el resultado de la prueba de frotamiento (*wipe test*) para hacer la evaluación ajustada. U.S. EPA considera que la exposición residencial por exposición a madera tratada no es significativa, por la baja presión de vapor del triadimefon (< 1 x 10⁻⁶ mm Hg).

La información disponible de U.S. EPA sobre **evaluación del riesgo ambiental** por exposición a triadimefon y triadimenol exclusivamente cubre los usos mayoritarios mencionados anteriormente, lo que es entendible porque también

en dichos usos se liberan directamente al ambiente.^{[70], [71]} En la evaluación más reciente se concluye que, para dichos usos, los principales riesgos ecológicos derivados del uso de triadimefon fueron los posibles riesgos crónicos para las aves y los mamíferos, el riesgo para las plantas terrestres, el riesgo crónico para los peces y los invertebrados acuáticos de agua dulce y de estuarios y marinos, y el riesgo crónico para las abejas melíferas. No se registran incidentes relacionados con el triadimefon.

Por otra parte, está disponible al público la evaluación de riesgo de la NZ EPA^[72] para una formulación comercial de tratamiento de madera contrachapada y chapa de madera laminada, con la siguiente combinación de principios activos: triadimefon 375 g/L, ciproconazol 42 g/L y bifentrina 30 g/L. Las conclusiones del documento establecen que los riesgos ecotóxicos del producto para el ambiente son similares a los de otras sustancias aprobadas para tratamiento de madera. Los potenciales riesgos surgen del derrame durante el transporte, almacenamiento o uso, que puede resultar en contaminación de cursos de agua, drenajes o suelo. Es probable que esto pueda mitigarse estableciendo los controles prescritos y adicionales. Debido al patrón de uso, la exposición al ambiente se considera muy poco probable. No obstante, podría ocurrir en etapas posteriores del ciclo de vida del producto (p.ej. aserrín contaminado o disposición inadecuada de virutas o productos).

6.1.6.4 ISOTIAZOLINONAS

Las isotiazolinonas son preservantes que se encuentran comúnmente en muchos productos de consumo de varios países, incluidos productos de limpieza, cosméticos y pinturas a base de agua. Las isotiazolinonas son un grupo de compuestos heterocíclicos que contienen un enlace N-S activado que, al reaccionar con los nucleófilos celulares, le confiere actividad biocida, actividad que puede aumentarse con la presencia de cloro en la molécula. Este enlace también les permite reaccionar con proteínas celulares, provocando una reacción de sensibilización. Además, por su bajo peso molecular pueden penetrar la piel.^[73]

Hay cuatro miembros de la familia de las isotiazolinonas que se emplean en preservación de madera: octilisotiazolinona (**OIT**), diclorooctilisotiazolinona (**DCOIT**), metilisotiazolinona (**MIT**) y la metilcloroisotiazolinona (**CMIT**), las dos últimas empleadas en general combinadas para tratamientos de madera a presión.²

En 2020 la U.S. EPA abrió un período para comentarios públicos de los borradores de las evaluaciones de riesgo de las isotiazolinonas.^[74] Dichas versiones revisadas de U.S. EPA son las principales fuentes de información para los resúmenes de evaluación de riesgo de DCOIT,^[75] OIT^[76] y MIT/CMIT.^[77]

6.1.6.4.1 DCOIT

El documento de U.S. EPA incluye el uso del DCOIT como preservante de madera con tratamiento a presión como métodos de aplicación, a concentraciones en el rango de 500 a 1.600 ppm p.a., no existiendo al momento del informe (2020) incidentes severos registrados con dicha sustancia afectando la salud humana (sólo 3 leves por irritación ocular, dérmica y náuseas), ni

tampoco afectando a la vida silvestre acuática y terrestre. No se considera en esta sección el uso del DCOIT en pinturas, que luego puedan usarse sobre madera.

La **evaluación de riesgo ocupacional** por exposición dérmica no mostró resultados preocupantes, tanto para operarios del tratamiento como manipuladores de madera tratada (MOE 770 y 130, respectivamente, con LOC = 100). Las correspondientes MOEs por inhalación son de 210 y 19, que no son preocupantes para exposiciones de corto y mediano plazo, pero sí para largo plazo (LOC = 30).^[78] Se entiende que la exposición calculada es sin EPP, por lo que podría mitigarse con equipo de protección respiratoria.

La **evaluación de riesgo a la salud de la población general** concluye que el uso del DCOIT en preservación de madera no incide en la exposición a través de la dieta o el agua de bebida. U.S. EPA evaluó los escenarios residenciales usuales para madera tratada, de exposición oral incidental y dérmica de niños en terrazas y juegos en exteriores, basándose en resultados de dos estudios de residuos desprendibles por frotamiento (*wipe tests*) de madera tratada. La exposición oral incidental no es preocupante (MOEs 460 y 7500), pero sí los MOEs dérmicos, que varían entre 1,6 y 53 (LOC = 100). Para mitigar estos riesgos, se requerirían medidas como cubrir la madera tratada con pintura no tóxica.^[79]

Los resultados de la **evaluación de riesgo ambiental** por el uso de DCOIT no encontró riesgos para organismos terrestres, ni tampoco para los peces de agua dulce, invertebrados o plantas por la lixiviación de DCOIT desde la madera tratada de un único muelle^[80] en un estanque de granja (20.000 m³). Sin embargo, existen posibles riesgos agudos para los peces de agua dulce si hay más de 3 muelles en el estanque de granja. Además, debido a la exposición continua a través de la lixiviación directa, es posible que se produzca un riesgo crónico para los peces de agua dulce y los invertebrados si hay más de 2 muelles. Si bien la evaluación se hizo para un cuerpo de agua dulce, por el perfil de ecotoxicidad similar con los organismos de sistemas estuarinos y marinos, el riesgo de muelles en cuerpos de agua estuarinos y marinos serían comparables a los evaluados en cuerpos de agua dulce.

En términos comparativos, el riesgo para ambientes acuáticos del uso en DCOIT en muelles es mayor que el uso en pintura exterior y en madera tratada en ubicaciones terrestres (p.ej. cercas) porque el lixiviado está entrando continuamente en el cuerpo de agua. Análogamente, los riesgos para los organismos bentónicos derivados del uso del DCOIT en la celulosa y el papel (por el efluente industrial) son mayores que los derivados de su uso en pintura y preservación de madera. La U.S. EPA expresa estos resultados indicando que el uso de mayor riesgo es “protector” del de menor riesgo: si está habilitado el uso de mayor riesgo, habilita al menos relevante.

6.1.6.4.2 OIT

El uso de OIT para preservación de madera (tratamiento de manchas por inmersión o aplicación con espray) es minoritario respecto a su uso en pinturas y

recubrimientos, plásticos y resinas, fluidos para trabajar metales, y resinas y adhesivos.

La **evaluación de riesgo ocupacional** de U.S. EPA para cuatro actividades en el tratamiento de madera (operación del tanque de inmersión, mantenimiento del aserradero, asistencia química, limpieza de equipos) dio como resultado que tanto en la exposición por inhalación como la dérmica, al menos en algún caso los MOEs no son suficientemente altos como para considerar que los riesgos son aceptables: 4 para inhalación en limpieza de equipos (LOC = 10 para corto plazo; LOC = 30 para largo plazo) y 0,33 a 4,5 para dérmico (LOC = 100). La exposición por inhalación se puede controlar con equipo de protección respiratoria (PF10), que llevaría el MOE a 40. Para exposición dérmica los resultados son utilizando guantes, por lo que esta medida no es suficiente. No se esperan exposiciones ocupacionales post-aplicación preocupantes.

En 2020 U.S. EPA no encontró registrados incidentes fatales, mayores o moderados asociados al manejo de OIT.

La **evaluación de riesgo a la salud de la población general** realizada por U.S. EPA no contempló el uso de OIT para tratamiento de madera, probablemente por su uso minoritario y por los niveles de riesgo no aceptables encontrados para varios usos mayoritarios: aplicaciones no profesionales en residencias de pinturas y limpiadores (tanto por inhalación como por vía dérmica) y post-aplicación por vía dérmica, en el contacto con pisos de PVC y textiles (incluso lavados) tratados con OIT. Los riesgos provenientes de la dieta se evaluaron como aceptables, incluso para la población más sensible (niños 1-2 años) y considerando riesgo agregado (ingesta de distintas fuentes).

Con respecto a los **riesgos ambientales**, U.S. EPA evaluó que no se esperan riesgos para los organismos terrestres (incluso polinizadores) para todos los usos actuales del OIT. OIT es muy altamente tóxico para las plantas y organismos acuáticos, con excepción de los peces marinos y estuarinos, para los cuales es altamente tóxico (un nivel menor). Para las especies aviares el OIT es moderadamente no tóxico. No se identifican metabolitos que sean preocupantes para organismos no objetivo. U.S. EPA identifica varios usos actuales (industria de celulosa y papel, torres de enfriamiento de agua y pinturas) que pueden resultar en exposiciones acuáticas no aceptables, pero no se menciona el uso para tratamiento de madero dentro de éstas.

6.1.6.4.3 MIT/CMIT

Para el uso en preservación de madera, según indica la evaluación de riesgo de U.S. EPA de 2020, en los productos registrados hasta ese año dichas isotiazolonas se usan combinadas y no por separado. Su uso como preservante de madera, al igual que ocurre con el OIT, no es el mayoritario, dado que predomina su uso en plásticos, pinturas y productos de limpieza domésticos, entre otros.^[81] Las concentraciones empleadas en preservación de madera y productos de madera varían entre 13 y 63 ppm para tratamientos a presión, y entre 15 y 54 ppm para tratamientos por spray e inmersión.

La **evaluación de riesgo ocupacional** por exposición a MIT/CMIT en tratamientos a presión dio como resultado que no hay riesgos preocupantes tanto para exposición dérmica como por inhalación. Para los trabajadores de operaciones de limpieza en el proceso de tratamiento con MIT/CMIT de manchas de hongos en madera, los resultados mostraron riesgos no aceptables en exposiciones por inhalación de corto y mediano plazo (MOE = 0,75, LOC = 10) y de sensibilización de la piel por exposición dérmica (MOE = 48, LOC = 100), como también las reacciones dérmicas alérgicas (MOE = 0,004 a 0,06; LOC = 10). Para los trabajadores en el resto de las operaciones de tratamiento de manchas, sólo las exposiciones por inhalación a largo plazo son preocupantes (MOE = 16 a 26; LOC = 30).

Para el **riesgo de riesgo a la salud de la población general**, la exposición a través de la dieta o agua bebible no implica un riesgo, incluso considerando los usos que pueden generar mayor exposición (detergente de vajilla, descargas industriales). Para la exposición residencial U.S. EPA no considera escenarios con madera tratada con MIT/CMIT, seguramente porque son mucho más probables los escenarios de exposición que evalúa: a través de contacto con pinturas y productos de limpieza domésticos, inhalación de vapores de pintura aplicada en paredes, incidentes de exposición oral y dérmicos post-aplicación en textiles impregnados y productos de limpieza de pisos. Algunos de estos usos y escenarios dan niveles de riesgo de preocupación, con posibilidad de generar dermatitis en la exposición dérmica y también por inhalación.

En cuanto al **riesgo ambiental**, basándose en los patrones de uso actual del MIT/CMIT, no se esperan exposiciones terrestres de preocupación. La evaluación de U.S. EPA para el uso de MIT/CMIT en madera tratada a presión en muelles dio como resultado que no hay riesgos para los organismos acuáticos asociados a dicho uso. Más específicamente, se precisarían > 2.500 muelles antes de que ocurran riesgos significativos.⁸⁰

6.1.6.5 PIRETROIDES

Los piretroides, que actúan en el sistema nervioso y en las funciones neuronales de los insectos por interacción con el canal de sodio, son análogos sintéticos de la piretrina, un insecticida de origen natural. Los dos piretroides sintéticos actualmente disponibles para preservación de madera son la permetrina y el bifentrina. Las fuentes de información para consultadas para estas sustancias fueron las evaluaciones de riesgo realizadas por U.S. EPA, [\[82\]](#), [\[83\]](#), [\[84\]](#), [\[85\]](#) y también la Comunidad Europea para el bifentrina.[\[86\]](#)

6.1.6.5.1 PERMETRINA

La permetrina está registrada para su uso en numerosos cultivos alimentarios y forrajeros, ganado y establos para ganado, medios de transporte, estructuras, edificios, programas de control de mosquitos de Salud Pública, numerosos espacios residenciales interiores y exteriores, mascotas y ropa. Los usos de la permetrina para preservación de madera representan entonces un uso marginal. La permetrina está clasificada como "probable cancerígeno para humanos" por vía oral.

En USA existían en 2022 cinco registros activos de la permetrina como antimicrobiano para el tratamiento industrial de productos de madera manufacturados (por ejemplo, marcos de puertas, alféizares y carpintería de ventanas), madera de construcción y troncos, para proteger contra la descomposición de la madera, los hongos y las termitas. Aunque U.S. EPA evaluó los usos acuáticos en 2022, determinó que estos productos no son adecuados ni se utilizan en aplicaciones en las que la madera entra en contacto directo con el agua o el suelo.

Para los **riesgos ocupacionales**, en 2009 U.S. EPA evaluó 39 escenarios de exposición, seleccionados como representativos de los más comprometidos, dado que sería difícil evaluar todos los casos individuales. Si bien en esos 39 no hay explícitamente escenarios de tratamiento de madera, todos los escenarios con riesgos mayores al LOC se han mitigado a través de requisitos de equipos de protección personal o controles de ingeniería alertados en las etiquetas.

En 2022 U.S. EPA publicó resultados de la evaluación de riesgo específica para manipuladores ocupacionales de permetrina, por exposiciones dérmicas e inhalatorias cuando aplican productos preservantes de madera con brochas/rodillos y pulverizadores manuales (equipos de pulverización presurizados manualmente y sin aire) y cuando aplican productos preservantes de madera mediante métodos de tratamiento por inmersión y presión en entornos industriales. Sin embargo, debido a la toxicidad relativamente baja de la permetrina y a los patrones de uso actuales, no se esperan efectos adversos por la exposición a los productos antimicrobianos registrados actualmente. Los MOE por inhalación para los trabajadores que realizan tratamientos a presión son de 5.200 a 22.000 (LOC=30) y los MOE por inhalación para los trabajadores que realizan tratamientos por inmersión son de 670 a 24.000 (LOC=30). No se prevén exposiciones ocupacionales por inhalación y dérmicas posteriores a la aplicación para los usos antimicrobianos de la permetrina.

los **riesgos a la salud de la población general** por usos residenciales se han mitigado al discontinuar o restringir ciertos métodos de aplicación y reducir algunas tasas de aplicación. Los riesgos no cancerígenos (dérmicos y por inhalación) para escenarios residenciales en que se manipulan productos con permetrina están por debajo del nivel de exposición permitido de U.S. EPA. Los MOE combinados (dérmicos y por inhalación) para todos los escenarios evaluados son superiores a 100 (entre 690 y 22 millones).

Por otra parte, todas las estimaciones de riesgo de cáncer evaluadas para la manipulación residencial de permetrina están por debajo del LOC de U.S. EPA en ≥ 5 eventos de exposición por año, excepto en dos escenarios que implican tratar pilas de madera con 19 L/d a una concentración de 5 g_{p.a.}/L de permetrina (se alcanza el LOC en 4 eventos). En cualquier caso, U.S. EPA no cree que dichos escenarios sean factibles o probables de ocurrir en función de la frecuencia de aplicación, la cantidad de producto manipulado y el método de aplicación.

En 2022 U.S. EPA advirtió que no había productos para preservar madera con permetrina destinados a uso doméstico, por lo que no hay riesgos por manipulación residencial.

Para la exposición residencial post-aplicación, U.S. EPA evaluó en 2009 riesgos de cáncer y no cancerígenos en una serie de escenarios para adultos y niños, considerando distintos usos de la permetrina, dentro de los cuales el más asimilable al tratamiento de madera sería el de juegos o ejercicios en superficies internas tratadas, como pisos (aunque la opción de U.S. EPA es vinilo). U.S. EPA opta por evaluar el escenario más conservador de un niño pequeño sobre alfombras tratadas, que da un riesgo no cancerígeno menor al LOC (MOE = 120 y 230, oral y dérmico, respectivamente; LOC = 100). Análogamente, el mismo escenario resultó en un riesgo de cáncer que no se considera preocupante (16 y 27 días para alcanzar el LOC, para dos tipos de aplicación en alfombra).

En 2022 U.S. EPA evaluó que también existe la posibilidad de exposición dérmica y oral incidental a corto y mediano plazo para niños (de 1 a <2 años) que juegan en terrazas y juegos contruidos con madera que ha sido tratada con permetrina como preservante de la madera (por más que el uso en contacto con el suelo o está previsto). El MOE oral incidental evidenció que no implica riesgo preocupante y por otra parte no se identificaron peligros dérmicos.

U.S. EPA concluyó también que las estimaciones de riesgo dietético (alimentos y agua potable) agudo y crónico (no cancerígeno) no exceden el LOC, siendo los niños pequeños el subgrupo más expuesto (16% y <1% del LOC para exposición aguda y crónica, respectivamente). La evaluación de riesgo de cáncer para la población de USA por la exposición combinada de alimentos y agua resultó en un riesgo despreciable, de $1,1 \times 10^{-6}$.

Los **riesgos ambientales** que evalúa U.S. EPA básicamente se centran en los usos agrícolas y en las descargas al sistema de alcantarillado. U.S. EPA reconoce el potencial de toxicidad acuática de los usos no agrícolas, pero no pudo evaluar los riesgos asociados con estos usos al momento del informe (2009) debido a la falta de datos disponibles. Para los escenarios evaluados, U.S. EPA abordó los riesgos agregando requisitos de zona de amortiguación y declaraciones de administración de productos a las etiquetas, modificando los patrones de uso para muchos usos.

En 2022 U.S. EPA estableció que para el uso de la permetrina como preservante de madera se espera que la exposición a organismos terrestres (incluidos los polinizadores) sea insignificante en función del potencial de exposición limitado. Las exposiciones a la permetrina de organismos acuáticos a partir de los usos de preservantes de madera pueden ocurrir cerca de estructuras debido a la escorrentía o la erosión, pero se espera que la exposición acuática sea limitada. El bajo potencial de exposición está asociado con (1) lixiviación limitada basada en la baja solubilidad en agua ($5,5 \mu\text{g/L}$) y (2) fuerte sorción al suelo y sedimentos ($K_{oc} = 26.930 \text{ L/kg}$). La sorción al suelo y sedimentos es la principal vía de disipación y es probable que evite una exposición acuática significativa en la columna de agua a partir de los usos terrestres y acuáticos, pero puede

aumentar las concentraciones de sedimentos y la posible exposición a invertebrados bentónicos.

U.S. EPA evaluó los riesgos para los organismos acuáticos si se utiliza madera tratada con permetrina en muelles en contacto directo con el agua.⁸⁰ No se identificaron riesgos preocupantes para los peces de agua dulce (agudos y crónicos) o las plantas acuáticas (vasculares y no vasculares). No obstante, la evaluación preliminar encontró riesgos por encima del nivel de alerta para los invertebrados de agua dulce en exposiciones agudas si el escenario incluye 2 muelles, en tanto lo mismo ocurre en exposiciones crónicas a partir de escenarios con 3 muelles.

Después de un debate más profundo sobre los usos previstos de los productos de madera tratados con permetrina entre sus registrantes y la U.S. EPA, ésta ha determinado que aquéllos no son adecuados para aplicaciones en las que la madera entra en contacto directo con el agua o el suelo. Además, la guía del Libro de Normas de la Asociación Estadounidense de Protección de la Madera (AWPA) de 2020 indica que la permetrina no está destinada a usarse en entornos acuáticos como los muelles.

6.1.6.5.2 BIFENTRINA

La bifentrina está registrada en USA para uso en diversos cultivos agrícolas y huertos/viñedos, plantas ornamentales (viveros e invernaderos interiores y exteriores), granjas de árboles de Navidad y huertos de semillas de pino, césped (granjas de césped, césped, campos de golf) y tratamientos perimetrales al aire libre (comerciales y residenciales). También está registrada para su uso para control de termitas; como champú para perros; como tratamiento de superficies interiores/exteriores para instalaciones residenciales, institucionales, públicas, comerciales, industriales y ganaderas/avícolas; y como tratamiento de semillas para diversos cultivos alimentarios/forrajeros.

En los documentos de U.S. EPA son escasas las menciones al uso de bifentrina para preservar madera o para control de termitas. Tampoco hay cálculos de riesgo específicos para dichos usos, debido a que representan un uso minoritario de la bifentrina. La División de Efectos en la Salud (HED) de la Oficina de Programas de Pesticidas (OPP) de U.S. EPA no ha evaluado cuantitativamente varios usos al aire libre del bifentrina para preservar madera, como en pilas/estructuras de madera y/o postes de cercas. U.S. EPA argumenta que las tasas de aplicación registradas para dichos usos son iguales o inferiores a las evaluadas cuantitativamente para patrones de uso/escenarios de exposición similares. Por lo tanto, considera que las evaluaciones de los escenarios que aborda “protegen” los usos mencionados. En otra mención aislada al uso del bifentrina en madera en los documentos de U.S. EPA, ahora para control residencial de termitas, estima que, debido a su baja presión de vapor, es poco probable que las personas se expongan al vapor de la bifentrina después de que se haya realizado una aplicación profesional del producto.

Por otra parte, en función de lo requerido por el Artículo 16(2) de la Directiva 98/8/EC, el registro de productos biocidas en la CE permite contar con una evaluación de riesgo de la bifentrina empleada para preservación de madera

(tipo de producto PT8).⁸⁶ A continuación se resumen las conclusiones de dicha evaluación de riesgo.

En la evaluación de **riesgo ocupacional**, los procesos industriales de tratamiento por inmersión y por impregnación con vacío, incluyendo en el primer caso la manipulación post aplicación, mostraron riesgos aceptables en la medida que se utilice como EPP guantes nuevos y overol de algodón (MOE = 391 y 134, respectivamente; LOC = 100). Para uso profesional a nivel residencial, se evaluaron las aplicaciones con pincel y espray, con resultados de riesgos aceptables en la medida que se utilice como EPP guantes nuevos y overol de algodón (MOE = 347 y 212, respectivamente; LOC = 100). Se estima que el método de inyección a nivel residencial puede considerarse con riesgo aceptable si se utilizan guantes y se evita contacto directo con derrames.

Para la **evaluación de riesgo a la salud de la población general**, se evaluaron el mismo tipo de aplicaciones residenciales, pero a cargo de no profesionales. En este caso, la exposición por aplicación con espray resulta en riesgo aceptable (MOE = 103), así como la estimación para inyección, pero no es aceptable para aplicación con pincel (MOE = 91; LOC = 100).

Para exposiciones secundarias (esto es, con madera ya tratada) de la población general, se consideraron tres escenarios de corto plazo: adulto lijando madera tratada, adulto manipulando madera tratada mojada y niño masticando trozo de madera tratada (escenario incidental). En todos los casos resultaron riesgos aceptables (MOE = 9.615, 209 y 417, respectivamente; LOC = 100). En los escenarios de largo plazo se consideraron cinco escenarios: adulto lijando madera tratada, adulto en una habitación con madera tratada, niño en una habitación con madera tratada, niño jugando en equipamiento tratado del patio y niño pequeño jugando sobre terraza de madera tratada y llevándose las manos a la boca. En todos los casos los resultaron riesgos aceptables (MOE = 3.505, 581, 446, 2.737 y 282, respectivamente; LOC = 100).

Para escenarios de exposición combinada de adultos (profesionales o no), niños y niños pequeños, el único escenario que resultó en riesgo no aceptable es el de un adulto no profesional aplicando con espray y manipulando madera tratada mojada (MOE = 69).

Para la evaluación de **riesgo ambiental** no se contemplaron los usos en ambientes interiores, tanto profesionales como de usuarios domésticos, porque las emisiones al ambiente pueden considerarse despreciables en estos casos.

Las exposiciones para aplicaciones industriales contemplaron los tratamientos por presión de vacío y por inmersión (incluyendo el acondicionamiento post tratamiento) y para el almacenamiento industrial de la madera tratada previo a su embarque.

En relación con los tratamientos in situ en exteriores, las emisiones se estimaron para aplicaciones con pincel y con espray (los tratamientos por inyección están restringidas a aplicaciones en interiores, con emisiones despreciables hacia el ambiente).

Para la madera en servicio, se estimaron las emisiones en los escenarios definidos como “postes de cerca”, “casa”, “barreras para ruido” y “puente sobre estanque”.

No se esperan riesgos para los **microorganismos de plantas de tratamiento de efluentes** domésticos (STP) ni por **emisiones a la atmósfera**, debido a la extrema baja volatilidad del bifentrin. Tampoco se esperan riesgos por contaminación de **agua subterránea**, debido a la fuerte adsorción del bifentrina en suelo.

Para la evaluación de riesgo en el **compartimento terrestre** se considera que el suelo expuesto está hasta 50 cm de distancia de la madera tratada y hasta 50 cm de profundidad.

Las aplicaciones industriales por impregnación e inmersión generan exposición al suelo a través de la disposición de lodos de planta de tratamiento, pero el riesgo es aceptable. El almacenamiento en exteriores sobre suelo desnudo de madera a continuación del tratamiento por impregnación o inmersión genera un riesgo no aceptable, que se mitiga significativamente con un piso impermeable (p.ej. concreto) y un techo de protección.

Los riesgos calculados para escenarios de aplicaciones in situ inmediatamente después de la aplicación son no aceptables, para todas las combinaciones posibles (pincel o espray, profesionales o amateurs, preventivo o curativo, cerca o casa).

Los riesgos calculados para escenarios de madera en servicio resultaron no aceptables para madera que fue tratada por aplicaciones con pincel o espray, tanto en escenarios de casas como de cercas. Por otra parte, para madera tratada por impregnación o inmersión, el único escenario con riesgo no aceptable es para cercas tratadas por inmersión.

Los riesgos para el **compartimento acuático** incluyen agua, sedimento y plantas de tratamiento de efluentes (STP). En el caso de las aplicaciones industriales por impregnación e inmersión, se estima un riesgo no aceptable proveniente de la liberación de a aguas superficiales a través de la STP, que recibe las emisiones de la planta industrial y la lixiviación de las áreas de almacenamiento. Este riesgo no aceptable ocurre aunque se consideren mecanismos de remoción como la adsorción en partículas suspendidas. La forma de mitigar este riesgo es mediante un tratamiento específico efectivo de dichas emisiones.

Las aplicaciones in situ de bifentrina con pincel o espray en escenario de exteriores (puente sobre estanque) muestran un riesgo muy alto para organismos acuáticos inmediatamente después de la aplicación, aun considerando mecanismos naturales de remoción por adsorción. Este tipo de aplicación debería entonces estar restringida a madera que no esté próxima a cuerpos de aguas superficiales.

Para escenarios de madera en servicio, en el caso de puente sobre estanque se repite el riesgo no aceptable, que podría mitigarse cubriendo la madera tratada con una pintura que evite la lixiviación. Para barreras contra el ruido, el riesgo es aceptable en la medida que la lixiviación es conducida a una STP.

6.1.6.6 IPBC

El IPBC (3-iodo-2-propinil-N-butilcarbamato) es un carbamato organoyodado, registrado por primera vez en USA en 1975 para uso como desinfectante, fungicida y alguicida. Los usos incluyen adhesivos industriales, pieles / cueros / productos de cuero (superficies), papel (almacenado), textiles y cordelería, fluidos para corte de metales, recubrimientos industriales y otros productos de especialidad, además de los usos para preservación de madera con tratamientos presurizados y no presurizados.

La más reciente evaluación de riesgo por exposición al IPBC realizada por U.S. EPA^[87] que se encontró, establece la necesidad de realizar evaluaciones específicas para los usos en preservación de madera. Por tal razón, al igual que para el bifentrin, se recurre a la evaluación realizada específicamente para ese uso en la Comisión Europea.^[88]

La evaluación de **riesgo ocupacional** contempló las exposiciones primarias en uso industrial para 6 escenarios (doble vacío, presión de vacío, CO₂ supercrítico, inmersión, recubrimiento por flujo y espray automatizado) y 4 escenarios no industriales con aplicaciones por profesionales (con espray manual, con pincel y por inyección). Se asume que en todos estos usos industriales y profesionales se emplea el producto según las condiciones de uso normal y con el EPP recomendado. Todos los MOE calculados fueron mayores que el LOC de 100, indicando riesgos aceptables, en el rango de 146 (para inmersión) a 10.000 (para CO₂ supercrítico).^[89]

Dentro del riesgo ocupacional también se calculó la potencial exposición secundaria al IPBC por la ruta de inhalación (aguda y crónica) en escenarios de adultos lijando postes de madera tratada, que resultó en una exposición aceptable (MOE > 100).

Los **riesgos a la salud de la población general** evaluados incluyen exposición primaria por aplicación no profesional del producto en exteriores (con espray o pincel), que resultaron en exposiciones aceptables, con MOE en el rango 250 a 700.

Para exposición secundaria de la población en general se consideraron los escenarios estándar de niños pequeños masticando un trozo de madera tratada desprendido o jugando en estructuras desgastadas de juegos infantiles y llevándose las manos a la boca (exposición dérmica y oral), así como niños jugando en estructuras exteriores (juegos infantiles). Además, se tiene en cuenta el escenario para adultos, bebés y niños que tiene en cuenta la exposición crónica a preservantes de madera que puede surgir del tratamiento de madera en interiores (inhalación de residuos volatilizados en interiores).

El riesgo durante la exposición secundaria al IPBC se considera aceptable porque no se superan los respectivos AOEL para la exposición a largo y corto plazo y los índices MOE calculados fueron superiores a 100.

Los **riesgos ambientales** se evaluaron básicamente para los mismos escenarios estándar mencionados para el bifentrin, considerando las etapas de aplicación industrial e *in situ* (profesional y amateur), almacenamiento y de madera en servicio para exteriores.

Los escenarios industriales asumen que se descarga a una planta de tratamiento (STP) en la cual el IPBC pasa a su metabolito PBC (misma molécula que IPBC, pero sin yodo), el cual no se degrada y llega a aguas superficiales, en tanto el lixiviado de la zona de almacenamiento llega a una pequeña cañada. Para el tratamiento *in situ* consideran la aplicación de formulaciones (base acuosa y orgánica) en un puente sobre un estanque pequeño que se contamina. Para completar la **contaminación de aguas superficiales** por madera en servicio se considera el mismo puente y también barreras de ruido, cuya lixiviación va a una STP y de ahí a un curso de agua.

Para la **contaminación de suelo** se considera el almacenamiento industrial en exteriores de madera tratada, los tratamientos *in situ* con pincel (profesional y amateur) del exterior de una casa de madera, y para madera en servicio la lixiviación de una casa de madera y de barreras de ruido. La consiguiente **contaminación del agua subterránea** con IPBC o PBC podría ocurrir en sitios de almacenamiento después de algunos años de exposición continua (si no hay medidas de control), pero no se espera que ocurra a partir de madera tratada en servicio, por el tiempo medio de descomposición en suelo del IPBC (0,196 d a 12°C).

La **contaminación del aire** no es relevante por la baja presión de vapor del IPBC.

El **riesgo evaluado para el ecosistema acuático** no es aceptable para la contaminación proveniente del almacenamiento industrial, pero no resulta preocupante para las aplicaciones industriales en sí, ni para las aplicaciones *in situ*. En cuanto a la madera en servicio, se encontró un riesgo para la mayoría de las aplicaciones, pero sólo en los primeros 30 días, por lo que la evaluación considera que debería aceptarse este uso por el corto período de riesgo.

El **riesgo evaluado para el suelo** no es aceptable para el almacenamiento industrial en exteriores, como lo es en general con cualquier preservante en un escenario de suelo sin protección. Cubrir el área de almacenamiento con techo y su suelo con concreto mitigan este riesgo, así como el riesgo de largo plazo para aguas subterráneas. Los riesgos para escenarios de aplicaciones in situ y lixiviación de madera tratada en servicio no son aceptables para los primeros 30 días, con lo que se aplica el mismo criterio que para impactos en el medio acuático. Si además se toman medidas de mitigación de cubrir el suelo durante la aplicación y los primeros 30 días de exposición, el riesgo se reduce drásticamente.

Para la **disposición final de madera tratada con IPBC** es poco probable que resulten en riesgos ambientales si la incineración se realiza en condiciones controladas ni si se dispone en áreas de relleno sanitario con precauciones especiales.

El clorotalonil es un nitrilo con actividad fungicida, registrado por primera vez en USA en 1966, y que actualmente se utiliza para una variedad de aplicaciones alimentarias convencionales (papas, maní, tomates, hierbas, trigo, árboles frutales y de frutos secos), así como en usos no alimentarios (césped residencial y no residencial, campos de golf, plantas ornamentales, etc.). Por otra parte, en USA está registrado también para uso antimicrobiano en productos de construcción, adhesivos, bloques y superficies de hormigón, pinturas, yeso, metales y madera. El uso en madera no es, por tanto, la aplicación mayoritaria del clorotalonil. Los resultados de los análisis de riesgo que se presentan a continuación son los publicados por U.S. EPA en 2023.^[90]

De los **riesgos ocupacionales** por exposición directa al clorotalonil, U.S. EPA evaluó su uso en tratamiento a presión de manchas por hongos en productos de madera, y determinó que el riesgo no era preocupante. U.S. EPA no identificó un punto final para exposición dérmica sistémica al clorotalonil, por lo que considera que no es un riesgo preocupante, tanto para exposición directa como secundaria en la manipulación de madera tratada. U.S. EPA no tiene registros de incidentes con humanos atribuidos al uso de clorotalonil como antimicrobiano, uso que incluye los tratamientos de madera.

U.S. EPA establece que no se esperan **riesgos a la salud de la población general** a través de residuos de clorotalonil en los alimentos, en su uso para preservación de madera y productos de madera (y como antimicrobiano, en general). Dado que se espera que el uso convencional agrícola del clorotalonil como fungicida resulte en mayores residuos en agua potable que los usos como antimicrobiano en general (y preservación de madera en particular), U.S. EPA considera que no se requiere una evaluación de riesgo.

Para exposición residencial en usos antimicrobianos, U.S. EPA no evalúa la exposición dérmica al clorotalonil por el mismo criterio mencionado en riesgo ocupacional, en tanto por inhalación evalúa sólo el uso de pinturas preservadas con clorotalonil, no para preservación de madera. Si bien en un documento previo^[91] U.S. EPA planteaba la necesidad de evaluar el riesgo de la aplicación residencial de clorotalonil como preservante de madera, no se encontraron referencias más actuales a este uso específico. De hecho, la EPA de Nueva Zelanda prohibió en 2017 la venta de productos con clorotalonil al público general (mayormente por su uso en césped residencial) debido a su toxicidad aguda por inhalación, limitando su uso a profesionales con equipo de seguridad mandatorio.^[92]

Para público general, U.S. EPA evaluó la exposición oral incidental secundaria (post aplicación) a madera tratada a presión con clorotalonil, midiendo con *wipe test* el residuo que se desprende a 14 y 180 días después del tratamiento. Los resultados mostraron que el riesgo es no preocupante (MOE = 1.200 para residuo máximo; LOC = 100). Esta exposición oral incidental agregada a las exposiciones orales por usos convencionales del clorotalonil sigue indicando un riesgo no preocupante (MOE = 370 > LOC = 100).

En la evaluación de **riesgos ambientales**, U.S. EPA establece que no se esperan riesgos preocupantes para especies terrestres (incluyendo polinizadores) a partir

de los usos antimicrobianos registrados actualmente, que incluyen la preservación de madera, debido al bajo potencial de exposición.

Para especies acuáticas, la modelación de U.S. EPA demostró que el uso de clorotalonil como preservante de madera habilitaba instalar >90 muelles⁸⁰ con un área superficial total de unos 650 m², antes de que aparezcan riesgos preocupantes para los organismos más sensibles, en este caso los invertebrados de agua dulce. Por tanto, cuando se utiliza clorotalonil como preservante en madera tratada a presión, no se esperan riesgos a especies estuarinas o de agua dulce, basándose en los datos que demuestran la limitada lixiviación desde la madera y la baja solubilidad en agua (<1 mg/L), y sin necesidad de considerar el potencial de adsorción al suelo y sedimento, que reducen la concentración en agua.

Los datos de ecotoxicidad indican que el clorotalonil es menos tóxico para los invertebrados bentónicos que para los que viven en la columna de agua. No obstante, en base a la adsorción y persistencia del clorotalonil en suelos y sedimentos, así como la toxicidad a algunos organismos bentónicos más sensibles, es posible un riesgo para éstos, pero para usos de clorotalonil en pinturas y coberturas exteriores o descargas de la industria de pulpa y papel (U.S. EPA no menciona su uso en preservación de madera).

En 2020 U.S. EPA no tenía registros de incidentes ecológicos ocasionados por usos de clorotalonil como antimicrobiano, que incluye la preservación de madera, aunque si tiene varios clasificados como “posibles” para usos convencionales del fungicida.

6.1.6.8 BENZOTIAZOLES (2-MBT Y TCMTB)

El TCMTB (1,3-benzotiazol-2-ilsulfanilmetil tiocianato) y el 2-MBT (2-mercaptobenzotiazol) son utilizados en USA y Canadá para preservación de madera y productos de madera, en el control de manchas de hongos y moho, pero no figuran dentro de los habilitados por la Directiva de Productos Biocidas de la Unión Europea (BPD 98/8/EC).^{[93], [94]} La información de las evaluaciones de riesgo que se resume a continuación es de los documentos publicados por U.S. EPA.^{[95] [96] [97]}

El MBT se registró por primera vez en USA en 1949 como sal de sodio en un producto preservante industrial, en 1955 como sal de cinc, y en 1956 como ácido.

El 2-MBT es además uno de los metabolitos principales del TCMTB, y es generalmente menos tóxico que éste; por lo tanto, la mitigación de cualquier riesgo del TCMTB va a proteger de riesgos del 2-MBT, por lo que la evaluación de riesgo ambiental se realiza solamente para el TCMTB. Además, la evaluación de riesgo que hizo U.S. EPA para el 2-MBT es de 1994, frente a la del TCMTB de 2006, por lo que cuenta con más información.

Las evaluaciones de **riesgo ocupacional** para la exposición directa al TCMTB en usos antimicrobianos del TCMTB dieron como resultados, con algunas excepciones (que no incluyen la preservación de madera), MOEs dérmicos y por inhalación mayores al LOC de 100 para exposiciones de corto e intermedio

plazo, siempre que se utilice un EPP de capa simple (guantes) para el vertido abierto o bien se utilicen medidas de mitigación (p.ej. bomba dosificadora).

Para el riesgo de aplicadores/mezcladores/cargadores de la sal de sodio del 2-MBT en exposiciones de corto e intermedio plazo, U.S. EPA calculó un MOE de 47.000, muy por encima del LOC de 100.

Para la evaluación de riesgo ocupacional post aplicación (exposición secundaria), U.S. EPA consideró la preservación de madera con TCMTB, principalmente con métodos no presurizados. El TCMTB puede aplicarse para control de manchas de hongos en madera recién cortada, incorporarlo en tableros de partículas o usarlo para tratar chips de madera. Cuando se usa como control de manchas de hongos, el producto se puede sumergir, rociar o impregnar en la madera mediante un tratamiento a presión, en tanto que cuando se usa en tableros de partículas, el TCMTB se incorpora a la resina o al agente aglutinante (0,3 % de p.a., basado en el peso seco de la madera).

Todos los escenarios de post aplicación resultaron en MOEs por encima del LOC de 100 para exposiciones dérmicas y por inhalación de corto e intermedio plazo, y por encima de 300 para las exposiciones de largo plazo, por lo que no hay riesgos preocupantes en dichos escenarios.

La **evaluación de riesgos a la salud de la población general** de U.S. EPA considera que los usos antimicrobianos aprobados del TCMTB sólo podrían tener impactos mínimos en el agua potable y que la exposición a través de alimentos en la dieta no incluye la preservación de madera (sólo se evalúa para el uso como preservante en papel para envolver comida rápida).

La exposición residencial no ocupacional por el uso de TCMTB para preservación de madera se espera sea mínima, debido a que principalmente se utiliza para el control de manchas de hongos (en madera recién cortada o chips).

La evaluación de riesgo para cáncer del 2-MBT no se considera apropiada debido a que es muy poco probable que ocurra una exposición repetida a lo largo de una parte significativa de la esperanza de vida.

En la evaluación de los **riesgos ambientales** asociados al uso de TCMTB y 2-MBT en preservación de madera, U.S. EPA encontró, empleando modelos Tier 1, riesgos no aceptables para organismos acuáticos si no se toman precauciones para limitar la lixiviación y escorrentía desde las instalaciones de tratamiento para control de manchas de hongos (áreas de almacenamiento de madera tratada). Si bien la disponibilidad del TCMTB en madera tratada para pasar a fase acuosa puede resultar en liberaciones mínimas al ambiente, tanto el TCMTB como el 2-MBT son muy altamente tóxicos a peces de agua dulce en base aguda, y toxicidad en general alta para otros organismos acuáticos.

Los riesgos para organismos terrestres por los usos del TCMTB como preservante de madera no fueron abordados por U.S. EPA por no disponer de modelos para estimar la exposición terrestre desde tratamientos para control de manchas de hongos. El TCMTB es levemente tóxico y el 2-MBT es prácticamente no tóxico para las aves en una base oral aguda, y ambos compuestos son levemente

tóxicos para las aves en una base oral subaguda. Para mamíferos, el TCMTB muestra baja toxicidad oral y dérmica aguda.

6.1.6.9 PXTS

El tetrasulfuro de polixilenol (PXTS) es una mezcla oligomérica de polisulfuros de alquilfenol formado por la reacción del ácido cresílico con cloruro de azufre y azufre, y es activo contra la descomposición, la podredumbre blanda y las termitas.⁹³ El primer registro (condicional) del PXTS en U.S. EPA fue a fines del 2005, para usos que incluyen el tratamiento térmico y a presión de productos de madera para emplearse en escenarios industriales y comerciales, tales como postes de servicios públicos, durmientes en vías de tren (productos en contacto con el suelo) y productos usados en ambientes acuáticos (p.ej. pilotes).^[98] De este documento de registro se obtuvo la información de las evaluaciones de riesgo por el uso de este producto, que se resumen a continuación.

A falta de datos experimentales para PXTS, para estimar la exposición a éste en la evaluación del **riesgo ocupacional** por contacto directo, U.S. EPA debió basarse en los datos de exposición unitaria al CCA, con los ajustes de las tasas de aplicación y cantidad diaria manejada específicas del PXTS. Basándose en su estructura polimérica y alto peso molecular, U.S. EPA estimaba que la absorción dérmica del PXTS es baja o nula, asumiendo entonces un valor de 1%. De esta forma, los MOEs dérmicos calculados para operador del tratamiento (TO) y asistente de tratamiento (TA) fueron 800 y 6800, respectivamente. Cuando se calcularon los MOEs para los TO en las condiciones específicas de los sitios de tratamiento en USA, en todos los casos estuvieron por encima del objetivo para exposiciones de corto plazo (LOC=300) y también del objetivo de intermedio o largo plazo (LOC=1.000), a excepción de un caso.

Como el PXTS es un sólido a temperatura ambiente, debe calentarse para tratar la madera. En el momento del registro en U.S. EPA no había suficiente información para saber cómo sería el comportamiento del PXTS al calentarlo (p.ej. formación de vapores y/o aerosoles), y así estimar los riesgos potenciales por inhalación. U.S. EPA estimó que los riesgos por inhalación no serían preocupantes (MOEs>1000), usando datos de la exposición oral y factores de incertidumbre adicionales, pero hasta que no se generen datos específicos para el PXTS otorgó sólo un registro condicional.

Para evaluar los riesgos ocupacionales de exposiciones secundarias (post aplicación), U.S. EPA sigue una metodología análoga a la empleada para exposiciones directas, basadas en información para el CCA. Las funciones de operarios evaluadas incluyen la del instalador del tranvía de carga (TS), el apilador (SO), el cargador (LO), el supervisor (SO), el calador de muestras de ensayos (TB) y el contador (TM). Por el tamaño pequeño de la muestra de operarios, las funciones anteriores se combinaron en una representativa de las actividades post aplicación. Con este operario representativo de la exposición post aplicación asociada al tratamiento a presión, los MOEs dérmicos calculados son de 2200 y 3300, que están por encima de los LOC para exposiciones de corto y largo plazo (300 y 1000, respectivamente).

En cuanto a los **riesgos a la salud para la población en general**, por exposición directa o secundaria, no están previstos usos residenciales, tanto de preservantes con PXTS que se apliquen a nivel domiciliario por profesionales o amateurs, ni tampoco los productos de madera tratada tienen usos en residencias (p.ej. postes, durmientes, pilotes de muelles).

Dentro de los **riesgos ambientales**, U.S. EPA considera que las exposiciones y riesgos para los organismos terrestres (aves, mamíferos y plantas) debidos a madera en servicio tratada con PXTS se espera que sean mínimos, por lo que no los calcula. Para organismos acuáticos, U.S. EPA estimó el riesgo con el escenario de lixiviación desde un muelle de madera tratada al agua de un estanque. Dado que el PXTS lixivia de la madera al agua niveles muy bajos en condiciones de laboratorio, sumado a las incertidumbres por otras suposiciones en el cálculo, U.S. EPA decidió usar, de forma conservadora, el nivel máximo de solubilidad del PXTS como concentración en agua: 12,5 ppb. Con este valor, no se superan los niveles de preocupación (LOC=1) de los indicadores (cocientes) de riesgo (RQ) para organismos acuáticos que típicamente se encuentran en la columna de agua.

U.S. EPA concluye en el mismo documento de 2005 que la información disponible es aceptable para un registro condicional del PXTS, pero indica que el proponente del registro del producto (Verigard Blend D de Akzo Nobel) debe suministrar información adicional para reducir la incertidumbre de la evaluación de riesgo. Akzo Nobel suministra a U.S. EPA la información adicional requerida sobre la eficacia para control de termitas^[100] y los ensayos ecotoxicológicos.^[100] No se encuentran en la web de U.S. EPA informes posteriores.^[101]

6.1.7 PRESERVANTES BASADOS EN BORO

Los compuestos de boratos son los más frecuentemente usados para preservantes de base acuosa sin fijación, esto es, que pueden lixiviar de la madera tratada.^[102] Los documentos tomados como fuente de información de las evaluaciones de riesgo que se resumen a continuación son de U.S. EPA para **ácido bórico / sales sódicas de borato**^[103] y **borato de cinc**,^[104] junto con las de la EU para ácido bórico.^[105]

En el primer documento citado de U.S. EPA, se aclara que por "ácido bórico / sales sódicas de borato" se refieren al ácido bórico y varias sales de borato de sodio usadas frecuentemente, con actividad herbicida (por desecación), fungicida (previniendo la producción de esporas asexuadas) e insecticida (incluyendo termitas). Las sales incluyen tetraborato de sodio decahidratado, tetraborato de sodio pentahidratado, tetraborato de sodio anhidro, octaborato disodio tetrahidratado (conocido como **SBX o DOT**) y metaborato de sodio. Los riesgos evaluados en ese documento se refieren sólo al ácido y dichas sales, no al del borato de cinc, el cual, dada la actividad propia del cinc, U.S. EPA evalúa en el segundo documento.

Por otra parte, el documento de la EU señala que, desde el punto de vista toxicológico y ecotoxicológico, es probable que el ácido bórico y las sales de

borato del párrafo anterior sean similares en términos de equivalentes de boro. Por lo tanto, los datos obtenidos a partir de estudios con diferentes boratos, si son llevados a equivalentes en boro, pueden emplearse para la evaluación de los riesgos a la salud humana y al ambiente para todas las sustancias del grupo.

Como se mencionó en la sección de evaluación de riesgo de **azoles de cobre Tipo A**, es preciso incorporarle el riesgo asociado al ácido bórico (49% de la mezcla), para la tasa de aplicación correspondiente.

La **betaína polimérica**, que se aplica mediante tratamiento a presión a los productos forestales, se registró por primera vez como ingrediente activo en USA en 2006. Es un éster de borato que, cuando se aplica a la madera, se descompone en DDAC (cloruro de didecildimetilamonio) y ácido bórico.² La evaluación de este compuesto se hace de forma independiente al resto de los boratos, tomando información de un documento específico de U.S. EPA.^[106]

6.1.7.1 PRODUCTOS CONTENIENDO DE BORO

6.1.7.1.1 ÁCIDO BÓRICO Y SALES SÓDICAS DE BORATO

El documento de evaluación de riesgo a la salud de U.S. EPA se centra en otros usos del bórico distintos a la preservación de madera, indicando la necesidad de más datos de exposición para éste. Por tanto, la información en esta sección se basa en el documento de la EU.

La evaluación de **riesgo ocupacional** por exposición directa (primaria) de la EU considera 7 usos profesionales: 1) tratamiento normal por impregnación a presión al vacío; 2) tratamiento de termitas por impregnación a presión al vacío; 3) tratamiento normal por presión al vacío doble; 4) tratamiento de termitas por presión al vacío doble; 5) tratamiento normal por inmersión; 6) tratamiento normal por aplicación automática de spray / inundación; 7) tratamiento normal por aplicación de spray on-site.

El informe de la EU concluye que en los 7 procesos listados no se pueden excluir los efectos adversos para la salud de los usuarios profesionales sin equipo de protección personal (EPP), debido a la exposición dérmica y respiratoria combinada al ácido bórico. No obstante, el uso de guantes protectores, overoles y máscaras antipolvo estándar para mezclar y cargar, y guantes protectores y overoles para la aplicación, es suficiente para reducir la exposición y obtener índices de riesgo <1 y MOE >100 para los 7 procesos.

El escenario de exposición ocupacional post aplicación (indirecta o secundaria) que evalúa la EU es la exposición repetida diaria durante el cortado y lijado de madera tratada realizado por profesionales. El informe concluye que no se esperan efectos adversos para la salud.

En la evaluación de la EU del **riesgo para la salud de la población en general**, los escenarios considerados fueron los siguientes: para exposición directa, la aplicación no profesional con spray y con pincel; para exposición post aplicación (indirecta o secundaria) el cortado y lijado no profesional de madera tratada en exposición única, y la exposición diaria repetida de un niño jugando en una estructura exterior con madera tratada de un patio de juegos. La

exposición de un niño mascando una astilla de madera se considera despreciable, así como la inhalación del compuesto volatilizado en interiores. En todos los casos los MOEs indicaron que no se esperan efectos adversos a la salud en las exposiciones evaluadas.

Con respecto a la exposición a través de la dieta, el informe de la EU establece que los boratos no se utilizan para preservar productos de madera que vayan a utilizarse en preparaciones de alimentos o raciones, y los materiales estructurales y de edificios de madera tratada tampoco se usan en contacto con alimentos o raciones. Por tanto, no se requiere aplicar la ingesta diaria aceptable (ADI) en la evaluación. En cuanto al agua potable, el boro presente en el agua de bebida proviene mayormente de origen natural (geológico o de la evaporación de agua marina), por lo que no se espera un incremento de la concentración de boro en agua por el liberado al ambiente desde la madera preservada con estos compuestos. La U.S. EPA llega a conclusiones similares, por lo que no realiza una evaluación de la exposición a través de la dieta (alimentos y agua).

La evaluación del **riesgo ambiental** se basa en la premisa de que una vez que los boratos se liberan al ambiente, la especie predominante es al ácido bórico no disociado. Por razones prácticas, el ácido bórico y otros boratos usualmente se expresan en base al boro. Debe tenerse en cuenta que el boro es un elemento natural que resulta esencial para diversos organismos.

Debido a que el boro está presente en entornos naturales, deberían tenerse en cuenta las concentraciones de fondo al derivar las predicciones de concentración a la cual no hay efecto (PNEC). Dado que hay un conocimiento inadecuado de las concentraciones naturales de boro en agua, sedimentos y suelo, en el informe de la EU se prefiere realizar la evaluación de riesgo en base a concentraciones agregadas. De esta forma, se estimaron para las especies más sensibles de cada medio las siguientes concentraciones agregadas en las cuales no habría efecto (PNEC_{add}): agua dulce 0,18 mg B/L; sedimentos de agua dulce 0,24 mg B/ kg_{p.h.}; planta de tratamiento de efluentes urbanos (STP) 1,8 mg B/L; suelos 0,4 mg B/kg_{p.s.}. El indicador de riesgo es PEC_{add}/PNEC_{add}, donde PEC es la concentración agregada que predice el modelo para los escenarios de emisiones evaluados.

La evaluación no consideró la contaminación por aire debido a que no hay datos toxicológicos y a que la emisión de boratos al aire es mínima por su baja presión de vapor. Tampoco se consideraron los efectos en la cadena trófica, dado que el boro no se bioconcentra ni bioacumula.

Los escenarios de emisiones considerados por la EU para las exposiciones ambientales son los de OCDE para: 1) tratamiento de madera, en procesamiento y almacenamiento industrial (presión al vacío, doble vacío, inmersión / inundación automatizada, y espray automatizado); 2) aplicaciones in-situ (barreras de ruido, puente, cercas, casa y poste de transmisión); 3) madera en servicio (barrera de ruido, cerca, revestimiento de casa, poste de transmisión, poste de cera). No se esperan emisiones al ambiente durante la vida

de servicio para usos de madera bajo techo, incluyendo la carpintería de interiores (preventiva) y el techado interior de madera.

Para los ambientes acuáticos de agua dulce los resultados muestran riesgos **no aceptables** (PEC/PNEC > 1, en el rango 7,9 a 79) en agua y sedimentos para tratamientos in-situ de puentes sobre estanques, así como durante el período de servicio de dicho puente. El mismo escenario conduce a concentraciones de agua que **no cumplen** con los criterios de potabilidad de agua para boro. El resto de los escenarios no muestran riesgos preocupantes para los ambientes mencionados.

Todos los escenarios de almacenamiento, tratamientos in-situ y madera en servicio en exteriores dan como resultados para ambientes terrestres riesgos **no aceptables** (PEC/PNEC > 1, en rango 5,1 a 600). Mientras que para los tratamientos in-situ y almacenamiento cuentan con medidas razonables para mitigación de los riesgos, no ocurre lo mismo para la madera en servicio en exteriores. El ácido bórico, al ser el boro un compuesto inorgánico, tampoco cumple los criterios de persistencia en suelo ($DT_{90, \text{campo}} < 1$ año y DT_{50} a 20°C < 6 meses) y por tanto se considera persistente.

Para aguas subterráneas, en todos los escenarios evaluados el uso de ácido bórico y sales de boratos resulta en riesgos **no aceptables**, dado que la concentración en agua subterránea modelada superaría el criterio de agua potable de 1 mg B/L (Directiva 98/83/EC Anexo I, parte B).

6.1.7.1.2 BORATO DE CINCO

La evaluación de riesgo de U.S. EPA se realizó para los usos registrados de borato de cinc en ese momento (2018), que en preservación de madera incluía postes de servicios públicos, durmientes de vías de tren y materiales compuestos (techados, carpintería, revestimientos de madera, contrapisos).

La exposición directa (primaria) por inhalación en **riesgo ocupacional** fue evaluada utilizando un estudio de higiene industrial en una fábrica de madera compuesta, en la cual se midieron las concentraciones de borato de cinc durante la manipulación de bolsas. El MOE por inhalación estuvo en el rango de 0,9 a 44, dependiendo del nivel de protección respiratoria empleado, por debajo del LOC de 300. Esto significa que **hay riesgos preocupantes**, aún empleando el nivel más alto de protección respiratoria (PF50 máscara completa).

El borato de cinc está disponible también en una formulación en pasta que se aplica en la línea contra el suelo para postes de servicios públicos, estructuras de madera y durmientes de madera. Puede aplicarse como un tratamiento de superficie empleando pincel, espátula o vendajes prefabricados, o se puede aplicar en agujeros perforados usando una pistola de calafateo. No se calculó un MOE de inhalación para estos productos en pasta, porque no se espera de éstos una liberación significativa de polvos o aerosoles.

También existe la posibilidad de exposición dérmica, sin embargo, esta vía de exposición no es preocupante porque no hay puntos finales toxicológicos dérmicos. Esto implica que las evaluaciones científicas no han encontrado

evidencia de toxicidad cuando la sustancia se aplica o entra en contacto con la piel, o que los niveles de exposición por esta vía son tan bajos que no representan una preocupación.

En la evaluación de **riesgos a la salud para la población en general**, no se espera exposición directa (primaria) residencial, dado que los productos se utilizan en plantas industriales que producen maderas compuestas, o bien se aplican en estructuras de madera industriales (postes, durmientes y puentes).

No obstante, existe sí la posibilidad de exposición residencial post aplicación (secundaria), ya que el borato de cinc puede utilizarse en terrazas residenciales. Por tanto, existe el potencial para que un niño pequeño tenga exposición oral incidental (ya se mencionó que no hay riesgo de exposición dérmica). Los MOEs para este escenario (que incluyen distintas concentraciones de borato de cinc y temperaturas) están en el rango de 6.400 a 270.000, mayores que el LOC de 100, por lo que no hay riesgo preocupante.

Para la evaluación de **riesgos ambientales** del borato de cinc se tuvo en cuenta que tanto el cinc como el boro son elementos presentes en la naturaleza y micronutrientes esenciales para plantas y animales. La mayoría de los usos del borato de cinc no van a resultar en exposiciones ambientales después de su fabricación. U.S. EPA evaluó los riesgos de la lixiviación desde madera tratada, pero las exposiciones esperadas son bajas y no se espera que la liberación de cinc y boro de los sus registrados vaya a incrementar las concentraciones.

Se espera que el cinc (como catión mono hidróxido de cinc) se adsorba fuertemente al suelo y sedimento debido a su carga negativa, en tanto el boro (como ácido bórico) se espera esté presente en la columna de agua, principalmente debido a su limitada adsorción. El borato de cinc tiene una toxicidad baja a moderada para los organismos no objetivo. En particular, se menciona la no toxicidad para abejas y potencialmente no tóxicos para los microorganismos de plantas de tratamiento de aguas residuales (WWTP) y organismos bentónicos. La cantidad lixiviada desde la madera compuesta, según datos experimentales, no resulta en un riesgo para los organismos acuáticos no objetivo.

6.1.7.1.3 BETAÍNA POLIMÉRICA

La betaína polimérica es una mezcla de un complejo de éster borato en equilibrio con sus precursores, el compuesto de amonio cuaternario (*quat*) DDAC (esto es, betaína monomérica) y ácido bórico. El complejo éster borato sólo existe en solución acuosa, donde en condiciones ácidas el equilibrio se desplaza desde el complejo hacia el monómero y ácido bórico/borato.

En la evaluación del **riesgo ocupacional** por exposición directa (dérmica e inhalación), durante los tratamientos por incorporación en productos de madera compuesta solamente se manipulan soluciones concentradas en el vertido abierto, por lo que se espera exposición a betaína polimérica. El MOE por inhalación de largo plazo está por encima del LOC de 300 y no es preocupante. Por el contrario, el MOE dérmica de 7,9 es menor al LOC de 300, representando un riesgo preocupante, aunque es una estimación derivada de

un estudio de exposición oral y un factor de exposición dérmico de 100% (conservador).

Durante los tratamientos a presión, por inmersión y por pulverización para la prevención de manchas de hongos, se aplican soluciones diluidas, que dan como resultado la formación de betaína monomérica, por lo que la exposición de los operarios es tanto a ésta como a la betaína polimérica.

Los MOEs dérmicos por exposición a la betaína monomérica (DDAC) no fueron calculados por U.S. EPA, porque el límite para exposición está basado en irritación dérmica, que es mitigada por el empleo de guantes de protección contra químicos, como es requerido en las etiquetas de la betaína polimérica. Los MOEs de largo plazo para exposición a betaína polimérica fueron de 1000 para operarios de tratamientos a presión y en un rango entre 11 y 260 para los operarios de tratamiento de control de manchas de hongos (por spray o inmersión). Al superar el LOC de 300 los resultados muestran entonces riesgos preocupantes para estos últimos operarios, pero no para los operarios de tratamiento a presión. Por último, para los trabajadores que manejan maderas, el MOE por exposición dérmica post aplicación (secundaria) resultó en 180, evidenciando un riesgo preocupante al superar el LOC de 300.

Los MOEs de largo plazo por inhalación de betaína polimérica resultaron por encima del LOC de 300 en todos los casos (tratamientos a presión, por inmersión y por spray). Por el contrario, los MOEs de largo plazo por inhalación de monómero de betaína (DDAC) estuvieron en todos los casos por debajo del LOC de 300 (12 a 48 para tratamientos a presión, 1,4 a 49 para tratamientos de control de manchas de hongos), evidenciando un riesgo preocupante.

En la evaluación de **riesgos a la salud de la población general**, no se espera una exposición en la dieta a la betaína polimérica a través de los alimentos, porque las etiquetas prohíben su uso en madera que pueda llegar a estar en contacto con alimentos o raciones. Tampoco se espera que ocurra a través del agua de bebida, porque la betaína polimérica es catiónica, resultando en su adsorción al suelo y sedimento por las cargas negativas de éstos.

Hay un potencial para exposiciones post aplicación dérmicas e incidentales orales en residencias, cuando los niños juegan en terrazas y estructuras (juegos del patio) de madera tratada. Un estudio del residuo que se desprende de la madera tratada encontró una mezcla de betaína monomérica (DDAC) y un dímero de ésta. Para exposiciones dérmicas al dímero (evaluado como betaína polimérica) se encontraron MOEs por debajo del LOC de 100, tanto para corto como mediano plazo (MOEs de 13 y 8, respectivamente). Para el DDAC el resultado también mostró un riesgo preocupante ($MOE = 1,7 < LOC = 10$).

Para exposiciones orales incidentales, los MOEs indican riesgos preocupantes en todos los casos evaluados ($MOE < LOC = 100$): exposición al dímero de corto y mediano plazo (MOEs de 50 y 32, respectivamente) y exposición al monómero DDAC ($MOE = 5,6$).

Para la evaluación del **riesgo al ambiente**, se parte de la base que en diluciones acuosas y/o a valores bajos de pH ($pH \leq 7$), la reacción de equilibrio de la

betaína polimérica va a favorecer el DDAC y el ácido bórico por encima de la forma complejo éster borato. Por lo tanto, se espera que en el medio ambiente predominen el DDAC y el ácido bórico, así como cuando la betaína polimérica lixivia de la madera tratada. Debido a su carga eléctrica positiva, el DDAC se adsorbe fuertemente en el suelo y los sedimentos cargados negativamente, por lo que se espera una exposición significativa a los organismos terrestres y acuáticos.

Por el contrario, el ácido bórico no se adsorbe en el suelo, pero lixivia de forma limitada desde la madera tratada, por lo que se espera una baja exposición de los organismos. Además, el ácido bórico muestra generalmente baja toxicidad a los organismos acuáticos. Basándose en la falta de exposición en ambientes terrestres y acuáticos, no se visualizan riesgos ecológicos preocupantes para especies no objetivo acuáticas o terrestres (incluyendo polinizadores) a partir de la betaína polimérica, incluyendo el DDAC y el ácido bórico.

6.1.8 ÓXIDO DE TRIBUTILESTAÑO (TBTO)

Los compuestos que contienen tributilestaño (p.ej. benzoatos, maleatos y óxido) están destinados a servir como bactericidas, microbicidas, fungicidas, alguicidas, molusquicidas y virucidas. Las categorías de uso los TBT incluyen establecimientos y equipamientos agrícolas, industriales y comerciales, revestimientos antiincrustantes (un uso cada vez más limitado) y preservación de materiales y de madera. Con respecto al TBTO específicamente, los productos que lo contienen en un rango de concentración de 0,30% al 53% se usan principalmente para preservación de madera y materiales.

La evaluación de **riesgo ocupacional** por exposición directa (primaria) de la U.S. EPA considera el tratamiento contra hongos de mancha a cargo de pintores profesionales, utilizando pincel, rodillo y pulverizador sin aire, en exposiciones de plazo corto e intermedio (ST/IT), por vía de inhalación y dérmica. La presión de vapor del TBTO es baja, por lo que la exposición por inhalación no es por vapores, sino sólo por aerosoles. Para aplicación con pincel, por vía dérmica el MOE = 24 y por inhalación MOE < 1, en tanto que por pulverización ambos MOE < 1. Todos estos valores están por debajo del LOC = 100. Por tanto, aún con equipo de protección personal (EPP) hay riesgo no aceptable de exposición ocupacional si se utilizan las tasas máximas de aplicación recomendadas en las etiquetas de los productos.

Para la manipulación de productos que contienen TBT mediante carga cerrada, la U.S. EPA espera que las exposiciones ocupacionales sean insignificantes o mínimas suponiendo que se utilicen de manera constante los EPP especificados en la etiqueta (es decir, overoles, pantalones largos, camisas de manga larga y guantes resistentes a productos químicos) y los sistemas cerrados de carga y suministro especificados en la etiqueta, como bombas dosificadoras de acoplamiento seco y de sistema cerrado. Por lo tanto, en estos casos no se justifica una evaluación cuantitativa de la exposición y los riesgos y se puede considerar que los riesgos no son una preocupación.

Para la evaluación de **riesgo a la salud de la población en general**, U.S. EPA consideró exposición directa (primaria) dérmica y por inhalación, y de corto plazo (1 a 30 días), por tratarse de particulares aplicando el producto de forma intermitente en sus viviendas

(p.ej. una o dos veces al año). Los escenarios evaluados son de aplicación sin presión del preservante de madera con TBTO en, por ejemplo, revestimientos, tejas, cercas, terrazas, carpintería, etc. Los resultados de la evaluación dan MOE < 1.000, que es el LOC objetivo en este caso, por lo que existe un riesgo preocupante en estos escenarios.

Para la evaluación riesgo en exposición post-aplicación (secundaria) U.S. EPA consideró un uso distinto a la preservación de madera (p.ej. niño usando ropa con textiles tratados, adulto en colchón tratado) por ser los casos más comprometido. La exposición por inhalación en estos escenarios (y también se haría en los de madera tratada) se descarta por la baja volatilidad del TBTO y a que en este caso no hay aerosoles como con los aplicadores. El resultado dio un MOE < 1.000, indicando un riesgo no aceptable, pero no hay conclusiones para el uso en madera.

En cuanto al **riesgo ambiental**, el TBTO plantea problemas potenciales en los ambientes acuáticos y sedimentarios, debido a que es extremadamente tóxico para los organismos acuáticos y tiene factores de bioconcentración y bioacumulación muy altos. Los niveles de exposición ambiental derivados de las aplicaciones de preservantes de madera con TBTO pueden ser entonces peligrosos para los organismos expuestos a lixiviados y escurrientías en aguas superficiales.

U.S. EPA calculó las concentraciones ambientales estimadas para la lixiviación de TBTO de la madera tratada al suelo y a las aguas superficiales para seis usos, incluyendo postes de transmisión, postes de cercas, cercas, postes de terrazas, cubiertas y casas. Los resultados mostraron que hay un riesgo no aceptable para peces e invertebrados acuáticos en exposiciones agudas. Si bien los resultados indican que para los mismos grupos no habría riesgo crónico, existe evidencia de lo contrario, en parte debido a su persistencia y bioacumulación. Por tanto, U.S. EPA estableció la necesidad de realizar una evaluación de riesgo más detallada.

Algo similar ocurre con especies terrestres (mamíferos y aves), para los cuales se requiere también una evaluación de riesgo más refinada por efectos directos, indirectos y al hábitat, a pesar de que, por ejemplo, la toxicidad a las aves se considera moderada. Existen reportes de la OMS que reportaron la toxicidad del TBTO para las abejas en colmenas de madera tratada con este preservante. U.S. EPA considera que si el producto se etiqueta adecuadamente prohibiendo el uso en colmenas de madera tratada con TBTO, puede asumirse que la exposición y el riesgo serán mínimos para las abejas.

La fuente de información para esta sección es el documento de U.S. EPA con la revisión de su registro.¹⁷

6.1.9 PRESERVANTES DE BASE BIOLÓGICA O NATURALES

Varias publicaciones científicas recientes hacen una revisión de la tendencia en curso hacia la búsqueda de sistemas de protección de la madera con base

¹⁷ U.S. EPA (2008) Revised Tributyltin – Containing Compounds (tributyltin oxide, tributyltin benzoate and tributyltin maleate) Registration Eligibility Decision Document (RED). <https://archive.epa.gov/pesticides/reregistration/web/pdf/tbt-compounds-red.pdf>

biológica (*bio-based*), y en particular de preservantes e impregnadores, promoviendo los principios de economía circular y las alternativas más eco-amigables, de bajo impacto.^{[107], [108], [109]} La circularidad se alcanzaría con el empleo de recursos renovables, produciendo madera tratada que al final de su vida útil puede reutilizarse o disponerse sin las limitaciones de un residuo peligroso.

Los preservantes e impregnadores de madera naturales mencionados en la última revisión encontrada incluyen extractos de diferentes partes de las plantas, tales como taninos (directamente o en formulaciones con copolímeros), resinas, aceites esenciales (estilbenos como pinosilvina (PS) y pinosilvina monometil éter (PSM)), monoterpenos (carvacrol), alcaloides (cafeína), destilados de aceites pirolíticos de cáscara de coco (CSPOD) o de corteza de picea, ácido salicílico y aceites de corteza de canela y de árbol de té. También se han estudiado extractos de origen no vegetal, como propóleos y, en una de las líneas de investigación más sostenibles desde el punto de vista ambiental, sustancias activas a partir de residuos, como la cascarilla plateada del café que resulta del proceso de tostado del café. Un resumen de los compuestos naturales ensayados para preservación de madera puede verse en (Khademibami & Bobadilha, 2022).^[110]

Aunque generalmente se supone que los productos químicos de origen biológico tienen menor ecotoxicidad, esto no siempre es cierto. Como se señala en uno de los estudios citados,¹⁰⁷ en algunas circunstancias, los productos biológicos pueden ser incluso más tóxicos que los disponibles comercialmente, lo que destaca la importancia de realizar estudios de ecotoxicidad exhaustivos antes del empleo de un producto e investigar cuidadosamente los efectos ambientales posiblemente asociados con él.

Si bien algunos de los preservantes de origen biológico muestran resultados promisorios, también presentan limitaciones. Por ejemplo, los taninos controlan algunos hongos, pero no todos, o tienen alta solubilidad, lo que facilita su lixiviación. Se precisan entonces estudios adicionales para evaluar más extensivamente estas características, además de los aspectos de ecotoxicidad.

En cualquier caso, la adopción comercial generalizada de preservantes de base biológica aún está en desarrollo, con productos dirigidos más a nichos de mercado o mercados con conciencia ambiental.

6.2 MODIFICACIÓN QUÍMICA Y TÉRMICA DE LA MADERA

Las crecientes presiones medioambientales que han aparecido en los últimos años han provocado cambios importantes en el campo de la preservación de la madera. En este contexto, las nuevas tecnologías, basadas en modificaciones térmicas o químicas, sugieren un creciente interés en éstas, en la perspectiva de una potencial prohibición progresiva de los productos biocidas.^[111]

La modificación química de la madera brinda una alternativa al uso de preservantes tradicionales químicos tóxicos o corrosivos que pueden dañar el ambiente por fugas del proceso de tratamiento o por lixiviación de la madera tratada. En su lugar, en la modificación química se preserva la madera de la degradación a través de la reacción de químicos con los polímeros de la pared celular, que minimiza su lixiviación.^[112] Por otra parte, la modificación de la madera por calor se considera un proceso eco-amigable por la ausencia de químicos adicionales.^[113]

A pesar de las mencionadas ventajas, la modificación de la madera involucra un procesamiento extra por encima del que requiere un material sin modificar (madera con tratamiento convencional), y esto implica que tiene asociado un impacto ambiental diferencial.^[114] Para tener una comparación más justa con tratamientos de preservación convencionales, la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (LCA) permite tener en cuenta todas las etapas del ciclo de vida de un producto de madera tratada para determinado uso específico (producción de insumos y formulaciones, procesos de tratamiento, tiempo en servicio y disposición final) y otros impactos ambientales además de los ecotoxicológicos, como pueden ser en cambio climático, emisiones de material particulado y compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y consumo de recursos naturales y de energía, entre otros. Un enfoque más amplio podría incluir las dimensiones social y económica, en lo que se denomina Análisis de Ciclo de Vida de Sostenibilidad (SLCA).

El proyecto europeo COST Action FP1407 "Understanding wood modification through an integrated scientific and environmental impact approach – ModWoodLife" se inició en 2015, con un programa de 4 años que apuntaba a investigar los procesos de modificación y el diseño de productos, con énfasis en sus impactos ambientales.^[115] En el marco de este proyecto se publicó un artículo^[116] que hace un relevamiento de las publicaciones científicas que incluían las palabras claves "LCA" y "modified wood", y en el período 1990 y 2016 sólo encontraron 15 publicaciones. Una publicación más reciente realizó una búsqueda similar, pero incluyendo también Declaraciones Ambientales de Productos (EPDs) y bases de datos, además de las publicaciones científicas.¹¹⁴ En este caso se estudiaron sólo dos parámetros: la energía embebida y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), comparando el potencial de calentamiento global (GWP) de la madera sin tratar (Unm) con modificación por tratamiento térmico (TMT) y con dos modificaciones químicas patentadas (Accoya y Kebony), para distintos grupos de maderas. Los promedios fueron los siguientes, en kg CO₂e/m³ de madera (desviación estándar entre paréntesis):

Unm = 75,6 (29,1); TMT = 311,4 (168,0); Accoya = 385,3 (126,5); Kebony = 710,33 (304,3).

El proceso de modificación resulta en una extensión en la vida de los productos, lo que tiene implicancias en el almacenamiento del carbono atmosférico secuestrado en los productos de madera cosechada (HWP), así como en la extensión de los ciclos de mantenimiento (esto es, mayor tiempo entre la aplicación de recubrimientos, una pintura alquídica blanca base en agua). Para comparar ahora con la misma base, se indican los años que debería durar

en años la madera modificada para compensar el mayor GWP que la madera sin modificar (que se estima dura 20 años), y considerando como alcance del sistema hasta la producción de la madera tratada:

$$\text{Unm} = 20; \text{TMT} = 82,3; \text{Accoya} = 101,9; \text{Kebony} = 187,9$$

La misma publicación reconoce que debería estudiarse también la comparación con tratamiento de preservación convencional.

Es importante tener en cuenta que cuando uno pretende comparar el desempeño ambiental de dos productos de la construcción, ya sean de materiales completamente distintos (p.ej. madera vs concreto vs acero) o todos de madera con tratamientos diferentes, la norma europea para EPDs de productos de la construcción (EN 15804 + A2) establece que, en rigor, se debe contemplar el ciclo completo de vida, incluyendo las etapas de reúso, reciclaje o recuperación del producto (Módulo D). Además, la comparación debe hacerse en un escenario con el mismo edificio para las dos alternativas comparadas. Por esta razón, no siempre es fácil sacar conclusiones a partir de información de LCA de distintos estudios.

Entre las maderas modificadas químicamente, la madera acetilada se comercializa actualmente como un producto "verde", con varios beneficios ambientales: tienen mucho menor huella de carbono que el acero, el concreto y que algunas maderas de origen no sostenible. Por otro lado, estudios recientes relacionados con la ecotoxicología de la madera furfurilada y de lixiviados de madera furfurilada, mostraron que no había ecotoxicidad significativa, en tanto su combustión no liberó compuestos orgánicos volátiles (VOCs) ni hidrocarburos poli aromáticos (PAHs) a niveles por encima de los normales para combustión de madera. Se cree entonces que la furfurilación de la madera es un proceso seguro para el ambiente.¹¹⁶

En 2017 se consideraba que, a pesar de que muchos aspectos de las modificaciones de la madera eran conocidas, la influencia fundamental del proceso en el desempeño del producto, el ambiente, y en los escenarios de fin de vida todavía deben incluirse en las investigaciones y desarrollo de las tecnologías de modificación de la madera. Esto requiere un análisis de la cadena de valor completa, desde la plantación forestal a través del procesamiento, instalación, etapa de servicio, fin de vida, segunda/tercera vida (en cascada) y, en último término, incineración con recuperación de energía.¹¹⁶

El consumo de energía contribuye considerablemente al impacto ambiental de la madera modificada. No obstante, la mejora de las propiedades durante la fase de uso puede reducir el impacto ambiental del procesamiento de la madera. Es importante tener en cuenta que el uso efectivo de la madera a través de toda su cadena de valor, desde la gestión forestal, a través de los múltiples ciclos de uso y a disposición al final de la vida, puede conducir a un desarrollo verdaderamente sostenible.¹¹⁶

En términos de sostenibilidad, la mayoría de los métodos de modificación químicos que utilizan reactivos sostenibles (como por ejemplo los biopolímeros PLA o PCL, el ácido cítrico (CA) y el ácido itacónico (IA)), todavía dependen en

mayor o menor medida de otros agentes no renovables para mejorar su eficiencia de modificación, lo que podría reducir la ventaja de las propiedades amigables con el ambiente. La tendencia en los estudios actuales sobre modificación química amigable con el ambiente está enfocada en la selección de reactivos ecológicos y en la mejora de las propiedades, en lugar de en la evaluación del desempeño ambiental de los productos resultantes. No obstante, todavía debe hacerse un esfuerzo para evaluar la ecotoxicidad y el comportamiento de degradación de la madera modificada químicamente, ya que es importante para determinar cuán sostenibles son las nuevas formulaciones¹¹⁷.

Una revisión de 2020 sobre Análisis de Ciclo de Vida de madera modificada térmicamente (TMW)¹¹³ concluye que varios aspectos de este proceso pueden contribuir significativamente al desempeño ambiental en todo el ciclo de vida de la preservación de la madera. En el comienzo de la cadena, la modificación térmica permite valorizar especies madereras locales y poco valorizable, limitando la deforestación. Con respecto al consumo energético y emisiones de CO₂ del ciclo completo de madera tratada térmicamente, la gran mayoría ocurre durante la etapa de secado, mientras que los referidos a la etapa de tratamiento térmico son muy bajos. Además, la huella de carbono de productos a partir de TMW puede ser negativa en los casos que los escenarios de fin de vida son incineración o reciclaje. Si bien pueden generarse emisiones de algunos compuestos orgánicos volátiles (VOCs) tóxicos durante el proceso térmico, pueden incorporarse soluciones para la recuperación y valorización de estos productos emitidos, y así lograr un proceso más amigable con el ambiente, incluso con beneficios económicos. Además, el hecho de que estos compuestos volátiles sean removidos durante la modificación térmica determina que los productos de TMW emitan menos compuestos tóxicos durante su vida en servicio, comparados con los productos de madera natural o de madera modificada químicamente. En resumen, el LCA revela que los procesos de modificación térmica tienen un gran potencial para producir materiales de madera ecológica cuando se toman en consideración tanto la producción, así como el uso y la disposición al final del ciclo de vida del material.

7.1 PRODUCTOS Y USOS

Las normativas sobre preservantes de madera buscan proteger la salud pública, el medio ambiente y garantizar la durabilidad de las estructuras de madera. Estas obligaciones varían según el país y el contexto de uso.

7.1.1 EUROPA

El Euro-código #5 regula el diseño estructural en madera y establece requisitos mínimos de durabilidad de la madera en Europa. La preservación de la madera está regulada por la norma EN 335 - Durabilidad de la madera y productos a base de madera - Clases de uso: definiciones, aplicación a madera maciza y productos a base de madera. La madera y/o productos de madera pueden ser de larga durabilidad natural (de acuerdo con la norma EN 350-2) para una clase uso en particular, o puede ser preservada mediante tratamiento de acuerdo con normas EN 351-1 y EN 460 (Comisión-Europea, 2004). En la Figura 11 se observa un diagrama de flujo para determinar si es necesario o no realizar un proceso de preservación a la madera, según las normas europeas en cuestión.

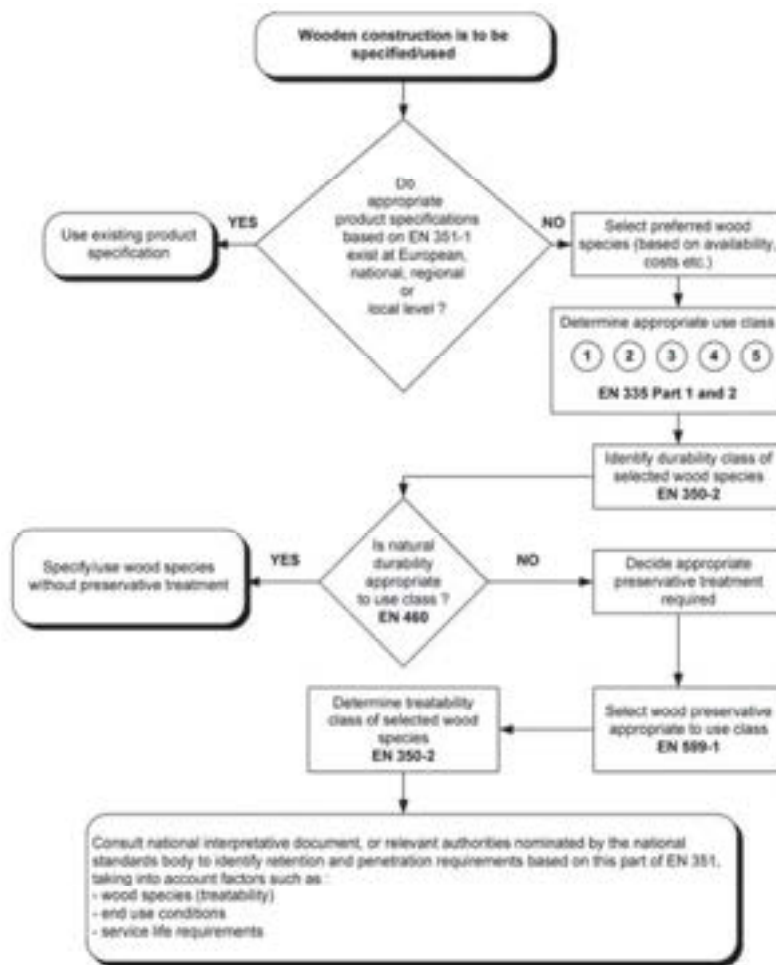


Figura 11. Diagrama de flujo para determinar si es necesario realizar un proceso de preservación a la madera (BS, 2007).

En general las maderas expuestas a humedad o agentes biológicos deben ser tratadas con preservantes aprobados.

El Reglamento Europeo de Productos de Construcción (UE) 305/2011 exige que los productos de construcción (incluyendo las maderas tratadas) cuenten con la certificación CE (Comisión-Europea, 2011), garantizando que cumplen con los estándares europeos de seguridad y sostenibilidad.

Los preservantes deben estar registrados bajo el Reglamento de Productos Biocidas (Biocidal Product Regulation, BPR), que regula su comercialización y uso en la UE. Los preservantes deben cumplir con las especificaciones del BPR, como la identificación de ingredientes activos permitidos (e.g., sales de cobre, biocidas orgánicos).

7.1.2 ESTADOS UNIDOS

En Estados Unidos el Código Internacional de Construcción (International Building Code, IBC) y el Código Residencial Internacional (International

Residency Code, IRC) exigen el uso de madera tratada en aplicaciones donde existe riesgo de exposición a humedad o plagas, como cimientos, estructuras exteriores y zonas con contacto directo con el suelo (International-Code-Council, 2021).

La Asociación Americana de Protección de la Madera (American Wood Protection Association, AWP) detalla en sus estándares los tipos de tratamientos y concentraciones químicas permitidas según el tipo de madera y su aplicación.

La Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA) regula la aprobación de preservantes, limitando o prohibiendo el uso de sustancias peligrosas, como el Arsénico en el CCA. La EPA clasifica los preservantes aceptados según su toxicidad y eficacia. Por ejemplo, el CCA está permitido solo para aplicaciones industriales (como postes de servicios públicos), no para uso residencial. Para usos más generales, el ACQ, el MCQ y los preservantes en base a Boro son recomendados para uso en mobiliario de exteriores y están aprobados por la EPA.

7.1.3 CANADÁ

En Canadá, el Código Nacional de Construcción (National Building Code, NBC), elaborado por la asociación de Preservadores de Madera de Canadá (Wood Preservation Canada, WPC), establece los requisitos básicos que debe cumplir la madera tratada según el caso de uso y su correspondiente exposición al deterioro de agentes biológicos y el clima (WPC, 2015). La WPC establece requisitos de impregnación según el tipo de edificación a realizar (pequeñas viviendas o grandes edificaciones), así como también según el tipo de exposición a agentes de deterioro de la madera.

Requisitos para Viviendas y Edificios Pequeños:

Los requisitos se aplican cuando se utiliza madera que puede estar sujeta a descomposición fúngica o infestación de termitas en:

- Paredes, pisos y techos.
- Balcones, terrazas y otras plataformas exteriores accesibles destinadas a la ocupación.
- Cimientos de madera permanentes.
- Muros de contención o estructuras de soporte de suelo críticas para la estabilidad de los cimientos, así como muros de contención o estructuras de soporte de suelo de más de 1,2 m de altura.

A) Requisitos de tratamiento para elementos de madera a nivel o cerca del suelo:

- Se requiere tratamiento preservante para la madera en contacto con el suelo.
- Excepto en los casos exentos mencionados a continuación, se requiere tratamiento preservante para los elementos de madera que estén a nivel del suelo o por debajo de él y que estén incrustados en mampostería o concreto.
 - Excepción: No se requiere tratamiento preservante si se deja un espacio de aire de 12 mm (1/2 pulgada) en los extremos y lados del elemento de madera.
- Excepto en los casos exentos mencionados a continuación, se requiere tratamiento preservante para los elementos de madera que estén a menos de 150 mm del suelo.
 - Excepción: No se requiere tratamiento preservante si el elemento de madera está apoyado sobre concreto y separado de este por una película de polietileno, fieltro para techos o materiales equivalentes de impermeabilización.

B) Requisitos de tratamiento para edificios en localidades con presencia de termitas:

- Se requiere tratamiento preservante para los elementos de madera que estén a menos de 450 mm (18 pulgadas) del suelo.
- Se requiere tratamiento preservante cuando:
 - Los elementos de madera están a 450 mm (18 pulgadas) o más sobre el suelo, pero no todas las caras de la estructura que los soporta son visibles.
 - Los elementos de madera están a 450 mm (18 pulgadas) o más sobre el suelo y no se han instalado barreras para evitar el paso de termitas.
 - Excepciones: No se requiere tratamiento preservante si los elementos de madera están a 18 pulgadas o más sobre el suelo y los elementos de soporte están expuestos, o si se han instalado barreras para evitar el paso de termitas.

C) Requisitos de tratamiento para elementos de madera no protegidos contra la exposición a la precipitación:

- Se requiere tratamiento preservante cuando el índice de humedad es superior a 1.00 y la configuración propicia la descomposición. El Apéndice del Código de Construcción describe configuraciones propicias a la descomposición. Por ejemplo, existen muchas estructuras de madera sobre el nivel del suelo donde la precipitación se acumula fácilmente o el secado es lento, lo que crea condiciones favorables para la descomposición. Tres ejemplos incluyen vigas que se extienden más allá de las cubiertas de techo, uniones entre elementos de terrazas y conexiones entre barandas de balcones y paredes).
- Las ubicaciones con un índice de humedad superior a 1.00 incluyen la Columbia Británica costera, Nuevo Brunswick, Nueva Escocia, la Isla del Príncipe Eduardo y Terranova, además de algunas localidades en Quebec. En Ontario hay muy pocas ubicaciones con un índice de humedad superior a 1.00, y la provincia no ha adoptado los requisitos de tratamiento para madera expuesta a la precipitación.

Requisitos estructurales para edificios más grandes:

A) Requisitos de tratamiento para edificios en localidades con presencia de termitas:

- Se requiere tratamiento preservante para los elementos de madera que estén a menos de 450 mm (18 pulgadas) del suelo.
- Se requiere tratamiento preservante cuando:
 - Los elementos de madera están a 450 mm (18 pulgadas) o más sobre el suelo, pero no todas las caras de la estructura que los soporta son visibles.
 - Los elementos de madera están a 450 mm (18 pulgadas) o más sobre el suelo y no se han instalado barreras para evitar el paso de termitas.
 - Excepciones: No se requiere tratamiento preservante si los elementos de madera están a 18 pulgadas o más sobre el suelo y los elementos de soporte están expuestos, o si se han instalado barreras para evitar el paso de termitas.

B) Requisitos de tratamiento para madera utilizada en cimientos:

- Se requiere tratamiento preservante para los elementos de madera en cimientos que estén expuestos al suelo o al aire por encima del nivel más bajo esperado de la capa freática.

Será responsabilidad del diseñador responsable del diseño de la envolvente del edificio determinar dónde se requiere madera tratada.

7.1.4 AUSTRALIA

La conservación de la madera en Australia está regulada por la Autoridad Australiana de Pesticidas y Productos Químicos Veterinarios (Australian Pesticides and Veterinary Chemical Authority (APVMA)) y las Normas Australianas de Conservación de la Madera (Australian Timber Preservation Standards)

La APVMA es responsable de la regulación y aprobación de los productos químicos utilizados para la conservación de maderas, garantizar que los fabricantes demuestren la eficacia y seguridad de los tratamientos químicos, así como también dictar la normativa en cuanto al etiquetado de los compuestos químicos utilizados para la preservación de maderas.

Actualmente el Departamento de Agricultura, Pesca y Forestación de Australia presenta una lista de preservantes químicos autorizados para su utilización en la industria de la preservación de la madera (Australian-Government, 2025). Dicha lista está categorizada entre preservantes en base acuosa (dentro de los que se encuentra el CCA), y otros tipos de preservantes (Australian-Government, 2025). Cabe destacar que ni la creosota ni el pentaclorofenol están autorizados para su uso en Australia.

La Junta Australiana de Códigos de Construcción administra el Código Nacional de Construcción (NCC), que establece las normas técnicas para el uso correcto de la madera tratada en la construcción. El NCC refiere a diversas normas australianas para garantizar que los productos de madera utilizados sean aptos para su propósito.

La serie AS o AS/NZS 1604 de las normas australianas de preservación de la madera especifican los estándares para la industria de la preservación de la madera para proteger la madera de las especies locales de organismos de descomposición y plagas de insectos. Establecen las especificaciones de tratamiento según el tipo de madera (latifoliada o conífera), su durabilidad, su exposición y sus requisitos de servicio (clases de riesgo) para diferentes productos de madera.

La serie AS 5605 proporciona información sobre la seguridad del consumidor para las siguientes maderas tratadas: AS 5605-1 CCA, AS 5605-2 ACQ, AS 5605-3 CA, AS 5605-4 LOSP, AS 5605-5 creosota y AS 5605-6 bifentrina. Nueva Zelanda

En Nueva Zelanda, el Código de Construcción NZS 3640:2003 y AS/NZS 1604 sirven como estándares fundamentales para el tratamiento de la madera, garantizando que cumpla con los requisitos de durabilidad y seguridad necesarios para su uso en la construcción (NZTPC, 2025).

Estos códigos establecen los procesos y criterios específicos que la madera debe cumplir para ser considerada adecuada para diversas aplicaciones en la edificación. Proporcionan directrices detalladas sobre cómo los preservantes deben penetrar y retenerse en la madera, asegurando que pueda resistir las condiciones ambientales a las que estará expuesta.

Además del NZS 3640:2003, otros estándares relacionados, como los incluidos en AS/NZS 1604, se aplican a productos de madera reconstituida, como tableros de partículas, contrachapado, madera laminada enchapada y madera laminada encolada. Estos

estándares son fundamentales para determinar cómo deben tratarse estos materiales a fin de garantizar que cumplan con los requisitos de durabilidad exigidos. Para determinar el estándar de tratamiento que necesita la madera, estas normas se basan en el concepto clave de clases de riesgo. Las clases de riesgo categorizan los peligros ambientales a los que la madera tratada puede estar expuesta, como la humedad, los insectos o la descomposición, según el uso previsto.

Al tratar la madera según los estándares establecidos por el Código de Construcción y en función de la clase de riesgo correspondiente, puede utilizarse con confianza en una amplia gama de aplicaciones en la construcción. Este enfoque no solo asegura una durabilidad y rendimiento a largo plazo, sino que también garantiza el cumplimiento total de las normativas de construcción de Nueva Zelanda, brindando tranquilidad tanto a los constructores como a los propietarios de viviendas.

El Consejo de Preservación de Madera de Nueva Zelanda (New Zealand Timber Preservation Council, NZTPC) es la autoridad líder en la preservación de madera en Nueva Zelanda y fue establecido en 1987. Tiene tres funciones principales: representar la industria de tratamiento y preservación de madera del país; gestionar el programa de garantía de calidad para madera tratada conocido como WOODmark®; así como proveer de información fidedigna para los productores y usuarios de maderas tratadas. Como la voz de la industria, garantiza altos estándares en el tratamiento de madera, aboga por la salud y la seguridad, y promueve la protección del medio ambiente. Se enfoca en cuestiones cruciales que afectan a sus miembros, como el cumplimiento, los estándares, la legislación, las auditorías y la regulación. Cierran la brecha entre las necesidades de la industria y los requisitos regulatorios, impulsando la excelencia en el sector del tratamiento de madera.

El NZTPC también es quién gestiona el programa WOODmark®, la marca de garantía de calidad independiente para madera tratada de Nueva Zelanda, que garantiza que la calidad del tratamiento de madera se mantenga en los niveles más altos y asegura que la industria de tratamiento de madera cumpla con los estándares de salud, seguridad y protección del medio ambiente. Todas las plantas de tratamiento con licencia de WOODmark deben operar de acuerdo con los estándares de salud, seguridad y protección ambiental. Estos se describen en la “Guía de mejores prácticas para el uso seguro de preservantes de madera y productos químicos antimancha”. La mayoría de las plantas de tratamiento deben operarse bajo la supervisión de un manipulador aprobado por HSNO (NZTPC, 2025).

7.1.5 CHILE

Chile es el país con mayor avance en lo que refiere a construcción y uso de la madera en Latinoamérica. Para unificar criterios entre productores madereros, constructores y usuarios finales, en dicho país desarrollaron una serie de normas técnicas para garantizar la calidad de la madera, y la preservación de la madera en particular (Madera21, 2020).

El Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) ha establecido la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) y en el Decreto Supremo N° 10 de Vivienda y Urbanismo (DS10), que precisan el uso del material para obras nacionales. El Reglamento de la OGUC establece la obligatoriedad de aplicar las normas [NCh819](#). Madera preservada – Pino radiata – Clasificación según riesgo de deterioro en servicio y muestreo y [NCh789/1](#). Maderas – Parte 1: Clasificación de maderas comerciales por su durabilidad natural, entre otras normas. Por su lado el DS10 especifica normas para control de calidad sobre el producto preservado (Hernández, s.f.)

La norma NCh173 establece la terminología generalmente utilizada en la industria de la madera. La norma NCh174 establece las unidades empleadas, dimensiones nominales y tolerancias de piezas de madera aserradas y cepilladas. La norma NCh176 establece el método para determinación del contenido de humedad en la madera, lo cual es de suma importancia para asegurar una correcta impregnación de los productos químicos durante el proceso de preservación.

Ya a nivel más específico, la norma NCh630 establece la terminología generalmente utilizada en la jerga de la preservación de la madera. El método para extraer muestras de maderas preservadas para determinar la retención y la penetración de productos químicos utilizados como solución preservante está establecido en la norma NCh631. La norma NCh755 especifica como obtener muestras para determinar la penetración de productos químicos en la madera tratada.

Por otro lado, la norma NCh819 establece los criterios de clasificación de la madera preservada de la especie pino radiata (especie de alta relevancia en el sector forestal en Chile), estableciendo los requisitos de penetración y retención de preservante, de acuerdo con su uso, riesgos en servicio y criterios de muestreo, como se detalla a continuación.

Inicialmente esta norma establece una lista de los posibles riesgos de deterioro de la madera de pino radiata, asociado a las condiciones de uso y distintos agentes biológicos de deterioro (INN, 2019), según la Tabla 13.

Tabla 13. Clasificación de riesgo, según uso y agente biológico de deterioro (INN, 2019).

Nivel de riesgo de deterioro	Condiciones de uso	Agente biológico de deterioro
Riesgo 1 (R1)	Uso en interiores Sobre el nivel del suelo Ambientes secos	Insectos, incluida la termita subterránea
Riesgo 2 (R2)	Uso en interiores Sobre el nivel del suelo Con posibilidad de adquirir humedad Ambientes mal ventilados	Hongos de pudrición e insectos, incluida la termita subterránea
Riesgo 3 (R3)	Uso en exteriores e interiores Sobre el nivel del suelo Exposición a las condiciones climáticas	Hongos de pudrición e insectos, incluida la termita subterránea
Riesgo 4 (R4)	Uso en exteriores e interiores En contacto con el suelo Con posibilidades de contacto esporádico con agua dulce	Hongos de pudrición e insectos, incluida la termita subterránea
Riesgo 5 (R5)	Uso en exteriores e interiores En contacto con el suelo Componentes estructurales críticos Contacto con agua dulce	Hongos de pudrición e insectos, incluida la termita subterránea
Riesgo 6 (R6)	Uso en contacto con agua salada	Hieraracteres marinos, hongos de pudrición e insectos

Luego, establece los requerimientos de retención mínima de principios activos utilizados para la preservación de la madera, asociado a cada nivel de riesgo de deterioro (Tabla 14).

Tabla 14. Retención mínima de ingrediente activo del preservante, según nivel de riesgo de deterioro de la madera (INN, 2019).

Riesgo	δ/OF (SAA) (kg/m ³)	CA-B (kg/m ³)	CCA (kg/m ³)	Creosota (kg/m ³)	LOSP (Permetrina) (kg/m ³)	LOSP (Permetrina más tebuconazol más propiconazol) (kg/m ³)	Permetrina más TBTN (kg/m ³) b)	MCA (kg/m ³)	μCA-C (kg/m ³)
1	4,4	1,7	4,0	No se debe usar	0,086	0,086 + 0,26	0,086 + 0,34	1,0	0,8
2	4,4	1,7	4,0	No se debe usar	No se debe usar	0,086 + 0,26	0,086 + 0,34	1,0	0,8
3	No se debe usar	1,7	4,0	No se debe usar en ambiente interior 128 - 400	No se debe usar	0,086 + 0,26	0,086 + 0,34	1,0	1,0 c)
4	No se debe usar	3,3	6,4	128	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar	2,4	2,4
5	No se debe usar	5,5	9,6	192	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar	3,7	3,7
6 Zona de ensayo al exterior de la prueba	No se debe usar	No se debe usar	24 ó 40 a)	400	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar
6 Zona de ensayo al interior de la prueba	No se debe usar	No se debe usar	14 ó 24 a)	400	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar

Notas

a) La retención mayor se debe usar cuando existe riesgo de ataque de *Teredo* y/o *Lyctidae tripunctata*.

b) Para preservante LOSP (permetrina más tebuconazol más propiconazol), el primer valor corresponde a la retención mínima de Permetrina y, el segundo, a la retención mínima de los azoles tebuconazol y propiconazol.

c) En clase de riesgo RJ, para maderas en exterior que estarán protegidas de la lluvia la retención mínima de ingrediente activo es 0,8 Kg/m³.

d) La densidad básica es la utilizada para pino radiata y ésta es 429 kg/m³.

Finalmente, establece los requisitos de penetración mínima según el tipo de producto de madera, la aplicación que se le vaya a dar, así como la clase de riesgo asociada, como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 15. Penetración de preservantes (INN, 2019).

Producto	Clasificación de riesgo	Requisitos mínimos de penetración en albura o profundidad mínima (mm) en las caras	
		Albura	Profundidad mínima (en caso de duramen expuesto en la superficie)
Madera aserrada	R1, R2 y R3	100%	3 mm
Madera aserrada de espesor menor que 50 mm	R4	100%	15 mm
Madera aserrada de espesor mayor o igual que 50 mm	R4	100%	25 mm
Madera aserrada	R5 y R6	90%	89 mm
Madera redonda sobre el nivel del suelo	R1, R2 y R3	100%	13 mm
Madera redonda en contacto con el suelo	R4	100%	25 mm
Postes y otros elementos estructurales	R5	90%	89 mm
Contrachapados1)	R1, R2, R3, R4, R5 y R6	Cada una de las chapas debe estar penetrada 100%	*
Madera laminada encolada2)	R1, R2, R3, R4, R5 y R6	100%	75 mm
Pilotes marinos	R6	100%	64 mm

1) Ver AWPA C9
2) Ver AWPA C28

En setiembre del 2023 el Gobierno de Chile emite un decreto reglamentario donde se establecen los requisitos mínimos para la rotulación de la madera para uso estructural en el sector de la construcción (Ministerio de Economía, 2023).

7.1.6 BRASIL

En Brasil, la regulación sobre la necesidad de preservación para determinados productos de madera es de larga data. El decreto #58.016/1966 establece la obligatoriedad de realizar una preservación química a toda la madera a ser utilizada en servicios públicos para transporte ferroviario, rodoviario, servicios telegráficos, telefónicos y de electricidad en territorio brasileño (DRNR-MAPA, 1966). Dicha ley estableció:

- La obligación de impregnar las piezas y estructuras de madera, tales como traviesas, estacas, vigas, viguetas, puentes, postes, travesaños, torres, postes de cercas, soportes de minas y taludes y todas aquellas otras que se utilicen en contacto directo con el suelo o en condiciones que contribuyan a reducir su vida útil.
- La obligación de utilizar preservantes de origen nacional, si hay disponibilidad.
- La creación del Departamento de Recursos Naturales Renovables (Departamento de Recursos Naturais Renováveis, DRNR), del Ministerio de Agricultura, como órgano encargado de promover, orientar y coordinar la aplicación de las disposiciones del presente decreto, con las siguientes responsabilidades en particular:
 - Registrar empresas, métodos y productos, expidiendo los certificados correspondientes;
 - Verificar la eficacia de los diferentes procesos de conservación requeridos para cada tipo de piezas de madera;
 - Demostrar procesos de preservación de la madera;

- Difundir conocimientos y especificaciones técnicas;
- Estimular la instalación y operación de industrias manufactureras de equipos y productos para la conservación de la madera;
- Promover cursos para la preparación profesional del personal subalterno y establecer becas para perfeccionamiento de técnicos especializados;
- Generar y difundir reglas e instrucciones especiales.

En este contexto, en el año 1969 se crea la Asociación Brasileira de Preservadores de Madera (Associação Brasileira de Preservadores de Madeira, ABPM) con el objetivo de asociar a las industrias químicas, las plantas de preservación de madera, universidades y centros de investigación, así como empresas que utilizan madera tratada (ABPM, 2018). La ABPM ha tenido un rol fundamental en el establecimiento de normas técnicas en dicho sector industrial, dada la falta inicial de normas nacionales.

En los últimos años la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT) ha establecido normas técnicas para los tratamientos preservantes de la madera y su utilización, incluyendo las especificaciones de los productos que deben utilizarse para garantizar la durabilidad y resistencia de la madera tratada.

- NBR 16143:2024 – Wood Preservation — Use Category System.
- NBR 6232:2013 – Penetração e retenção de preservativos em madeira tratada sob pressão.
- NBR 7511:2013 – Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaio.
- NBR 9480:2009 – Peças roliças preservadas de eucalipto para construções rurais – Requisitos.
- NBR 6236:2017 - Wood for reel of wires, ropes and cables – Requirements.
- ABNT NBR 7190-1:2022 - Timber Structures Part 1: Design criteria.
- NBR 16202:2013 – Postes de eucalipto preservado para redes de distribuição elétrica – Requisitos
- NBR 16201:2013 – Cruzetas roliças de eucalipto preservado para redes de distribuição elétrica.
- NBR 6236 – Carretéis para bobinas – especificações.

Las normas ABNT suelen ser de referencia para la industria y aseguran el cumplimiento de estándares de calidad y seguridad.

7.1.7 ARGENTINA

En Argentina la industria forestal tiene varias décadas de trayectoria. Sin embargo, en los últimos años el país vecino ha quedado relegado probablemente debido a la situación económica adversa, por lo cual el desarrollo de su industria se ha estancado. En lo que respecta a la industria del procesamiento y en particular la preservación de la

madera, Argentina cuenta con una lista de normas técnicas desde larga data para la estandarización de sus productos de madera.

La norma IRAM 9600:1998 establece los requisitos generales que debe cumplir la madera rolliza y aserrada impregnada con productos químicos para su protección ante agentes biológicos (hongos e insectos) y climáticos, por los métodos de impregnación vacío-presión (IRAM, 1998).

A su vez, cuenta con otras normas técnicas asociadas a la actividad de impregnación de la madera (IRAM, 1998), como la IRAM 9511:1993 (terminología general de la industria de preservación de la madera); IRAM 9532:1963 (metodología de determinación del contenido de humedad); IRAM 9544:1973 (metodología de determinación de la densidad aparente de la madera); IRAM 9508:1982 (metodología para la determinación de la retención de solución preservante, así como la penetración en la madera); la IRAM 9512:1982 (preservación de maderas con creosota); IRAM 9515:1991 (preservación de maderas con solventes acuosos); IRAM 9526:1992 (preservación de postes de madera con solventes oleosos (creosota), para líneas aéreas de energía); IRAM 9588:1982 (determinación de preservadores oleosos y humedad relativa impregnada); IRAM 9593:1983 (determinación de la presencia de productos derivados del petróleo (creosota) en madera); IRAM 9526:1992 (determinación de cromo, cobre, arsénico y boro en soluciones preservantes o en maderas preservadas, mediante método espectrofotométrico de absorción); así como la IRAM 9597:1991 (determinación de preservantes por espectroscopía de fluorescencia de rayos X).

En la siguiente tabla, la norma IRAM 9600 establece las clases de riesgo de degradación de la madera, según las condiciones de uso y tipo de exposición. Para cada una de estas configuraciones, la norma establece rangos de concentración mínima de retención de solución preservante, según el preservante a utilizar (CCA, CCB y Creosota).

Tabla 16. Clasificación de las condiciones de riesgo para la madera (IRAM, 1998).

Clase de riesgo	Clase de exposición	Condición de uso	Preservador	Retención Kg/m ³ (g)		Ejemplo de uso	
				Coníferas	Latifoliadas		
R0	Agua salada (1)	Madera que está constante o periódicamente en contacto con agua de mar, expuesta al ataque de organismos marinos.	CCA + Creosota	34 + 200	28 + 200	Madera redonda y Madera aserrada	Otras maderas, muebles, armarios, vigas, pilotes, tablas, etc.
			CCA Creosota	45 400	45 440		
R1	Agua dulce (1)	Madera que está constante o periódicamente en contacto con agua dulce o con suelos húmedos.	CCA	9,8	10,8	Madera redonda	Postes de uso agrícola bajo techo por almacenamiento permanente, puentes, pilotes, tablas, etc.
			Creosota	140/150(5)	153/170	Madera aserrada	Postes de uso agrícola, estructuras para jardines o construcciones y columnas.
			CCA Creosota CCA	5,8 140/150(5) 24	10,8 153/170 -	Madera aserrada	Puentes, pilotes, vigas, carpinterías, muebles, armarios, etc.
R4	En contacto con el suelo (1)	Madera interior o exterior, en contacto con el suelo.	CCA	9,8	10,8	Madera redonda	Postes para líneas de energía y telecomunicaciones, estructuras para jardines y para construcciones, pilotes.
			Creosota	140/150(5)	153/170 (4)		Postes para uso agrícola, puentes, cercas, pilotes, estructuras para vallas y huertos (rodigones).
			CCA Creosota	6,4 140/150(5)	7,2 153/170 (4)	Madera aserrada	Madera para puentes, revestimientos, cercas, pilotes, vigas y huertos.
R3	Exterior sin contacto con el suelo	Madera que no está en contacto directo con el suelo pero que está expuesta a la intemperie o intemperada.	CCA	6,4	7,2	Madera redonda y aserrada	Estructuras para puentes, cercas, estructuras para construcciones, vigas, columnas, pilotes.
			Creosota	140/150(5)	153/170		Muebles para jardín, estructuras, vigas, etc.
R2	Interior sin contacto con el suelo	Madera usada bajo techo sin contacto con el suelo, sin contacto con el agua.	CCA	6,4	7,2	Postes o maderas redonda	Estructuras para puentes, cercas, estructuras para construcciones, vigas, columnas, pilotes.
			CCB	9,8	9,5		Madera no estructural, puentes, vigas, etc.
			CCA	4,5	4,5	Madera aserrada	Madera no estructural, puentes, vigas, etc.
			CCB	5,0	5,5	Madera aserrada	Madera no estructural, puentes, vigas, etc.

Nota: CCA: Cationes cupro amoniacales
CCB: Cationes cupro bórnicos

7.1.8 URUGUAY

No se han encontrado en Uruguay disposiciones reglamentarias en relación a la utilización de madera preservada o la protección de la madera.

Sin embargo el documento del MVOT (2011) Estándares de desempeño y requisitos para la vivienda de interés social, establece en el punto 6, “Requisitos de durabilidad y mantenimiento”, la vida útil de los diferentes elemento de la vivienda según el impacto de la falla y a la facilidad y el costo de intervenir mediante acciones de mantenimiento o de sustitución (DINAVI-MVOTMA, 2011). Establece también un requisito de verificación mediante el estudio del proyecto revisión de antecedentes o evaluación de prototipos, admitiendo ensayos para materiales que no presenten antecedentes de uso.

Tabla 17. Requerimientos de vida útil de los elementos de una vivienda de madera (DINAVI-MVOTMA, 2011).

Vida útil de proyecto (VUP) para los sistemas y componentes, en años	
SISTEMA	VUP (años)
Estructura	60
Pisos interiores	20
Cerramientos verticales exteriores	60
Cerramientos verticales interiores	30
Cubiertas	30
Instalación de agua y desagües sanitarios	30

Por otra parte existe en Uruguay el “Documento de normativa común en maderas preservadas con CCA-C en el Uruguay”, elaborado por un grupo de preservadores de madera para establecer requisitos de retención de CCA-C en madera según el tipo de madera (pino o eucalipto) y según la clase de uso (Matra, 2025). Estos requisitos fueron basados en la norma A.W.P.A. (American Wood-Preservers' Association) (C1-98 – All timber Products) para el caso del pino y en normas argentinas (IRAM), australianas (Australian Standards) y Sudafricanas (SABS), para caso de eucalipto.

Se detecta la necesidad de regular este sector industrial de forma de estandarizar los productos de madera preservada.

7.2 REGISTRO DE PRODUCTOS

7.2.1 EUROPA

Reglamento de Productos Biocidas (BPR) - UE 528/2012:

En la Unión Europea, las regulaciones del Registro, Evaluación y Autorización de Sustancias Químicas (Registration, Evaluation, and Authorization of Chemicals, REACH) y del Clasificado, Etiquetado y Empaquetado (Classification, Labeling, and Packaging, CLP) obligan a los fabricantes de preservantes a evaluar los riesgos del uso de madera tratada y proveer información sobre el correcto uso y disposición final de la misma. La Directiva de Emisiones Industriales (Industrial Emissions Directive, IED) establece valores límites para las emisiones de plantas

de procesamiento de madera para proteger la calidad del agua y el aire. El Reglamento de Productos Biocidas (Biocidal Products Regulation, BPR) asegura que el uso de químicos en los preservantes de madera es efectivo y seguro, y que no atenta contra la salud humana o del ambiente (ECHA, 2024). Estas directivas promueven el reciclado y disposición final de la madera tratada en sitios seguros.

La Directiva 98/8/CE fue precursora del Reglamento BPR. Se centraba en la evaluación y autorización de productos biocidas. Aunque fue reemplazada por el BPR, estableció la base para las regulaciones actuales. Dicha directiva cubría la recopilación y revisión de todas las sustancias activas en el mercado, seleccionando las más adecuadas para la formulación de productos biocidas.

La BPR establece que la aprobación de las sustancias activas debe realizarse a nivel de la Unión Europea, mientras que la subsecuente autorización de los productos biocidas debe realizarse a nivel de los estados miembros de la unión.

Los preservantes de madera deben cumplir las regulaciones legales requeridas a todos los productos que contienen biocidas. Antes de la aprobación para su distribución, estos preservantes deben cumplir con un proceso de aprobación de acuerdo con la Ley Europea de Biocidas (BPR (EU) 528/2012), en donde se les exigen que cumplan con cierto grado de efectividad en la aplicación para lo cual fue diseñado. A su vez, se debe comprobar que el preservante es seguro de producir, de manipular durante su uso, así como también a lo largo de la vida útil de la madera tratada.

Los productos biocidas están clasificados en 22 tipos de productos, incluyendo preservantes de madera (tipo de producto #8). Solo los productos que contienen sustancias activas aprobadas pueden comercializarse y usarse en la UE.

La Tabla 18 presenta los principios activos con acción biocida aprobados en la Unión Europea para su uso en preservantes de madera al 13-03-2025 (Ministry-of-Environment-of-Denmark, 2024).

Tabla 18. Listado de sustancias activas biocidas normalmente utilizadas para la preservación de madera, aprobadas para su uso en la Unión Europea al 13-03-2025 (**Ministry-of-Environment-of-Denmark, 2024**).

Active substance	Deadline for product application (date of inclusion)	Cessation of the right to import, sale, use and possess biocidal products that have not been authorised pursuant to the principles of the BPD	Expiry date of inclusion	Inclusion Directive
Sulfuryl fluoride	1.1.2009	31.12.2010	31.12.2018	2006/140/EC
Dichlorfluanid	1.3.2009	28.2.2011	28.2.2019	2007/20/EC
Clothianidin	1.2.2010	31.1.2012	31.1.2020	2008/15/EC
Etofenprox	1.2.2010	31.1.2012	31.1.2020	2008/18/EC
Tebuconazole	1.4.2010	31.3.2012	31.3.2020	2008/56/EC
Propiconazole	1.4.2010	31.3.2012	31.3.2020	2008/76/EC
K-HDO	1.7.2010	30.6.2012	30.6.2020	2008/80/EC
Thiabendazole	1.7.2010	30.6.2012	30.6.2020	2008/85/EC
Thiamethoxam	1.7.2010	30.6.2012	30.6.2020	2008/77/EC
IPBC	1.7.2010	30.6.2012	30.6.2020	2008/79/EC
Thiacloprid	** (1.1.2010)	**	31.12.2019	2009/88/EC
Fenprolmorph	1.7.2011	30.6.2013	30.06.2021	2009/86/EC
Boric acid	1.9.2011	31.8.2013	31.8.2021	2009/94/EC
Boric oxide	1.9.2011	31.8.2013	31.8.2021	2009/98/EC
Disodium tetraborate	1.9.2011	31.8.2013	31.8.2021	2009/91/EC
Disodium octaborate tetrahydrate	1.9.2011	31.8.2013	31.8.2021	2009/96/EC
Tolyfluanid	1.10.2011	30.9.2013	30.9.2021	2009/151/EC
Dazomet	1.8.2012	31.7.2014	31.7.2022	2010/50/EU
Blifenthrin	1.2.2013	31.1.2015	31.1.2023	2010/10/EU
Fenoxycarb	1.2.2013	31.1.2015	31.1.2023	2011/12/EU
DCOIT (4,5-Dichloro-2-octyl-2H-isothiazol-3-one)	1.7.2013	30.6.2015	30.6.2023	2011/66/EU
Creosote	1.5.2013	30.4.2015	30.4.2018	2011/71/EU
Copper (II) oxide	1.2.2014	31.1.2016	31.1.2024	2012/2/EU
Copper (II) hydroxide	1.2.2014	31.1.2016	31.1.2024	2012/2/EU
Basic Copper carbonate	1.2.2014	31.1.2016	31.1.2024	2012/2/EU
Flufenoxuron	1.2.2014	31.1.2016	31.1.2017	2012/20/EU

Restricciones específicas al uso de determinados preservantes:

La UE ha restringido el uso de preservantes de tipo CCA (cobre, cromo, arsénico) para la mayoría de las aplicaciones (Comunidad-Europea, 2003), debido al potencial efecto cancerígeno tanto del cromo como del arsénico. Sin embargo, según la Directiva 2006/139/EC se realizan algunas excepciones de uso para casos en donde la madera sea tratada con CCA-C en instalaciones industriales autorizadas mediante el método vacío-presión-vacío (European-Union, 2006). Esta excepción admite el uso profesional de madera tratada con CCA-C siempre y cuando la madera tratada no esté en contacto directo con la piel humana o de animales, como puede ser la madera para uso estructural

en construcción, postes de alambrar, así como postes para líneas de transmisión de electricidad o telecomunicaciones.

Otro preservante con uso restringido en la UE es la creosota, también debido al potencial efecto cancerígeno de dicho principio activo. Cada estado miembro de la UE tiene la potestad de solicitar a un aplicador un análisis técnico-económico para evaluar si es posible o no sustituir la creosota por otra forma de preservación de la madera (European-Comission, 2011). En este sentido, solo se habilita el uso de creosota para usos industriales o profesionales específicos donde no haya contacto frecuente con la piel humana, y no exista una alternativa de sustitución más apropiada (Comunidad-Europea, 1994). En 2022 la UE renovó la autorización del uso de creosota como sustancia activa para uso como biocida tipo #8 (preservantes de madera), para su uso como solución preservante en durmientes de ferrocarril y en postes en líneas de transmisión de electricidad y telecomunicaciones (European-Comission, 2022). Para otras aplicaciones de uso residencial, se está tendiendo a sustituir tanto el CCA como la creosota por otros métodos de modificación química o térmica de la madera.

Otro principio activo que ha sido objeto de discusión en la UE sobre la posibilidad de restringir y/o prohibir su utilización para la conservación de maderas es el propiconazol (Brennan, 2024). Este biocida en base a Cobre es normalmente empleado en conjunto con otros principios activos como el tebuconazol y/o el IPBC. El propiconazol está clasificado como tóxico para la reproducción, debido a su potencial disruptor de las propiedades endócrinas, razón por la cual su utilización fue puesta sobre la lupa. A pesar de dichos cuestionamientos, la Comisión Europea, avalada por la Agencia Europea de Sustancias Químicas (ECHA), determinó que la prohibición del uso del propiconazol resultaría en un mayor impacto para la sociedad que los riesgos asociados a su uso en aplicaciones específicas, como puede ser el tratamiento de maderas para confección de puertas y ventanas para viviendas. Por este motivo, en noviembre del 2023 la Comisión oficialmente renovó la aprobación del propiconazol como sustancia activa autorizada para uso como producto biocida, específicamente como producto tipo #8, de sustancias químicas aptas para su uso como preservantes de madera (European-Union, 2023).

Asimismo, la CE ha alargado el período de validez de la autorización del carbonato de didecildimetilamonio, IPBC, tebuconazol, etofenprox y K-HDO como sustancias activas para uso en productos biocidas protectores de la madera (tipo #8), debido a una prolongación del proceso de renovación de su autorización más allá de su anterior fecha de expiración en 2023. En el caso del IPBC, el etofenprox y el K-HDO la evaluación de los productos incluirá estudios adicionales para evaluar los criterios para la determinación de las propiedades de alteración endocrina en organismos no objetivo.

El uso del DDAC está autorizado sólo para profesionales y se aplica mediante impregnación en autoclave vacío-presión, inmersión e inmersión en tanque

abierto. El plazo para la renovación de la autorización para su uso como preservante de madera se retrasó al 31 de julio de 2025 (Comisión-Europea, 2022).

El 3-yodo-2-propinilbutilcarbamato (IPBC) se utiliza en biocidas protectores de la madera, tanto para el pretratamiento de la madera (por inmersión, rociado, doble vacío, CO₂ supercrítico y vacío-presión) por parte de usuarios industriales/profesionales, como para el tratamiento protector de la madera in situ por inyección en agujeros y en aplicación con brocha, tanto por usuarios profesionales como aficionados. La fecha de expiración de la aprobación del IPBC para su uso en biocidas del tipo de producto 8 se retrasa al 31 de diciembre de 2027 (Comisión-Europea, 2025).

La fecha de expiración de la aprobación del Etofenprox para su uso en biocidas del tipo de producto 8 se retrasó al 31 de diciembre de 2027 (Comisión-Europea, 2025).

La aplicación de K-HDO en compuestos de madera está prevista sólo dentro de sistemas industriales, completamente automatizados. La fecha de expiración de la aprobación del K-HDO para su uso en biocidas del tipo de producto 8 se retrasó al 31 de diciembre de 2026 (Comisión-Europea, 2022).

La fecha de expiración de la aprobación del tebuconazol para su uso en biocidas del tipo de producto 8 se retrasa al 30 de junio de 2026 (Comisión-Europea, 2022).

En diciembre de 2024 se aprueba como sustancia activa para su uso en biocidas del tipo 8, la sustancia formada a través de la reacción del ácido bórico con la didecilamina y el óxido de etileno: betaína polimérica (Comisión-Europea, 2024). Según la comisión que evaluó la performance del biocida, dicho principio activo es conveniente para proteger maderas en interiores de las clases de uso CU1 y CU2, según norma EN 335, contra los siguientes microorganismos (higieneambiental.com, 2024):

- Escarabajo perforador de la madera *Hylotrupes bajulus* (maderas tipo CU1).
- Hongos de podredumbre parda y blanca, y gorgojo perforador de la madera *Hylotrupes bajulus* (maderas tipo CU2).

7.2.2 ESTADOS UNIDOS

La Ley Federal de Fungicidas, Insecticidas y Plaguicidas (Federal Insecticide, Fungicide, and Rodenticide Act, FIRPA) es el acto que regula la comercialización, uso y distribución de pesticidas, incluidos los preservantes de madera, en los Estados Unidos. La Ley Federal de Control Ambiental de Pesticidas (Federal Environmental Pesticide Control Act, FERCA) establece que la EPA es la agencia encargada de evaluar minuciosamente si un preservante o pesticida cumple con los requisitos necesarios para proteger la salud humana

y del ambiente. Los pesticidas/ preservantes que cumplen dichos requisitos son otorgados una licencia o registro que permite su distribución, venta y uso de acuerdo a las instrucciones y requerimientos identificados en la etiqueta del producto.

La EPA considera a los preservantes de madera como pesticidas y su uso está regulado. La agencia de control ambiental evalúa los riesgos potenciales para la salud humana y el medio ambiente antes de registrar y autorizar el uso de preservantes de madera, haciendo foco en asegurar que el producto químico utilizado como preservante sea eficaz y no presenten riesgos indebidos. Algunos preservantes están disponibles para el público general, mientras que otros tienen restringido su uso solo a aplicadores habilitados por el organismo de control ambiental. Los aplicadores certificados son individuos con entrenamiento especial para usar dicho pesticida.

Restricciones en el uso de CCA y Creosota:

Es importante destacar que la EPA ha restringido el uso de algunos de los preservantes de madera más utilizados (CCA, ACZA, creosota, pentaclorofenol), y son considerados pesticidas de uso restringido, debido a sus riesgos para la salud humana y el medio ambiente. Sin embargo, la madera tratada con dichos productos químicos no está prohibida. El uso de CCA está restringido principalmente a aplicaciones industriales, como postes de servicios públicos y madera estructural. La creosota se utiliza solo en aplicaciones industriales, como durmientes de ferrocarril y postes de cercas. Otros preservantes alternativos, como los boratos, naftenato de cobre y ACQ pueden ser utilizado para aplicaciones residenciales, y su uso no está restringido.

Los tres conservantes de madera de mayor uso históricamente (CCA, creosota y pentaclorofenol) se encuentran actualmente en proceso de revisión de registro, un proceso que la EPA lleva a cabo para todos los pesticidas registrados cada 15 años para garantizar que los productos puedan llevar a cabo su función prevista sin crear riesgos irrazonables para la salud humana y el medio ambiente (EPA, 2024).

En 2008, la EPA determinó que el CCA, la creosota y el pentaclorofenol podían seguir utilizándose siempre que se implementaran ciertas medidas de mitigación identificadas en los documentos de Decisión de Elegibilidad para la Reinscripción (Reregistration Eligibility Desition, RED). Estas medidas incluían controles de ingeniería como ventilación y puertas automáticas para bloquear y desbloquear los autoclaves de tratamiento.

En 2019, la EPA completó sus evaluaciones preliminares de riesgos para el CCA, la creosota y el pentaclorofenol como parte de su revisión de registro. En cada caso, la EPA encontró que, si bien las medidas requeridas por los RED reducían la exposición de los trabajadores, estos productos seguían planteando riesgos para la salud que preocupaban a los trabajadores que los aplicaban. También

se descubrió que la creosota y el CCA plantean riesgos para el medio ambiente.

En 2021, la EPA emitió decisiones provisionales propuestas para el CCA, la creosota y el pentaclorofenol para abordar los riesgos para la salud humana y el medio ambiente que conlleva el uso de estos productos químicos. La EPA determinó que los riesgos del pentaclorofenol superaban sus beneficios y propuso su cancelación. En el caso de la creosota y el CCA, la EPA propuso medidas de mitigación adicionales para proteger la salud de los trabajadores en las instalaciones de tratamiento de la madera. Respecto al Pentaclorofenol, el mismo fue discontinuado y no está permitida su producción desde febrero 2022. Sin embargo, los solicitantes registrados pueden continuar produciendo, vendiendo y distribuyendo preservantes de madera que contengan PCP mientras las instalaciones de tratamiento de madera realizan la transición de PCP a alternativas hasta el 28 de febrero de 2027 (EPA, 2024).

Estas regulaciones demuestran un esfuerzo coordinado tanto en la UE como en los EE. UU. para minimizar los riesgos asociados con el uso de preservantes de madera, promoviendo alternativas más seguras y sostenibles.

7.2.3 BRASIL

En Brasil, la regulación de los preservantes de madera está sujeta a un marco normativo que abarca aspectos ambientales, de salud pública, y de seguridad en el uso de productos químicos. Las normativas brasileñas buscan asegurar que los productos utilizados en el tratamiento de la madera no presenten riesgos significativos para la salud humana, el medio ambiente y los trabajadores de la industria maderera.

La legislación ambiental brasileña exige que todas las industrias que fabrican productos preservantes de madera y todas las plantas de preservación que utilicen estos compuestos estén registradas en el Instituto Brasileiro de Meioambiente y Recursos Naturais (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais, IBAMA). Las empresas que comercializan productos para el tratamiento de la madera, incluidas las importadoras, deben estar registradas en el IBAMA y presentar informes con los datos de ventas de estas sustancias (IBAMA-MMA, 1989). Todo producto preservante o ingrediente activo cuya finalidad sea preservar la madera también debe estar registrado.

Además, las plantas de preservación de madera también están obligadas a enviar informes semestrales al IBAMA. Estos documentos deben contener información mensual sobre las especies forestales utilizadas, el volumen de madera tratada, los preservantes empleados, la concentración de los productos y el total consumido.

Por otro lado, toda sustancia biocida, como pueden ser los agroquímicos y/o los preservantes de madera, deben contar con la certificación de clasificación toxicológica realizada por el Ministerio de Salud, para ser autorizado para su uso en Brasil. La Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria (ANVISA), del Ministerio de Salud Pública, es la agencia responsable de regular desde el punto de vista toxicológico los productos químicos utilizados en dicho país (IBAMA-MMA, 1989). Todos los productos que se comercializan en Brasil como preservantes de madera deben estar registrados ante esta agencia. ANVISA garantiza que estos productos cumplan con los estándares de seguridad y salud pública, evaluando su toxicidad y posibles efectos sobre los usuarios, para garantizar que no representen riesgos excesivos para la salud pública y el medio ambiente.

A su vez, el Gobierno de Brasil determinó que los productos químicos comercializados en dicho país deben registrarse según las pautas de clasificación y etiquetado establecidas en el Sistema Globalmente Armonizado (Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals, GHS) (Governo-do-Brasil, 2021). La ANVISA exige que los productos estén adecuadamente etiquetados, con advertencias claras sobre los peligros para la salud y el medio ambiente.

Respecto a restricciones para el uso de determinados productos químicos, en 2006 tanto la IBAMA como la ANVISA prohibieron el uso de las sustancias activas Lindano (gama-hexaclorociclohexano) y el Pentaclorofenol dentro del territorio brasileiro para su uso como preservantes de madera (IBAMA, 2006).

El Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento (MAPA) también regula el uso de preservantes de madera en el contexto de productos agroindustriales. Los productos que se utilizan en la protección de la madera destinada a usos agrícolas o ganaderos, como cercas o estructuras rurales, deben estar registrados ante este ministerio y cumplir con sus normativas específicas.

7.2.4 ARGENTINA

En Argentina el registro de productos agroquímicos y biocidas se realiza ante el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA). Dentro de dicha institución, la Dirección de Agroquímicos y Biológicos es la encargada de dichos registros (Leguizamon & Malavasi, 2024). Todo producto agroquímico y/o biocida que quiera ser comercializado en Argentina debe pasar por dicho registro. El SENASA también lleva a cabo un sistema de trazabilidad para el control de los productos fitosanitarios a lo largo de la cadena de valor. Toda persona y/o empresa que produzca, importe, sintetice, formule, manipule y/o distribuya algún tipo de producto biocida en Argentina debe cumplir con los requisitos exigidos por el Sistema Nacional de Trazabilidad de Productos Fitosanitarios.

7.2.5 CHILE

En Chile el registro y aprobación de productos químicos para uso como biocidas es llevado a cabo por la dirección de Servicio Agrícola y Ganadero, perteneciente al Ministerio de Agricultura. Según el listado de plaguicidas prohibidos con sustancias activas, el pentaclorofenol es el único producto químico usado para la preservación de maderas que se encuentra prohibida su utilización en Chile (SAG-Ministerio-de-Agricultura, 2023).

7.2.6 URUGUAY

En Uruguay, la regulación de los preservantes de madera se rige por normativas nacionales que buscan garantizar la protección del medio ambiente, la salud humana y la calidad de los productos. Aunque Uruguay no tiene un reglamento específico para preservantes de madera tan detallado como el Reglamento de Productos Biocidas (BPR) de la Unión Europea, existen regulaciones que controlan el uso de productos químicos en general, incluyendo los que se aplican para proteger la madera.

Entre las principales regulaciones y aspectos a tener en cuenta respecto a la regulación de los preservantes de madera en Uruguay cabe destacar el Decreto N° 307/009, que erige las bases para la normativa sobre los productos químicos y los productos peligrosos. Este decreto establece el marco regulatorio para el Registro y Control de Productos Químicos en Uruguay. Los preservantes de madera, al ser considerados productos químicos, deben registrarse en el Ministerio de Ambiente (MA), y cumplir con las normativas de seguridad y etiquetado. Dicho decreto también establece que las sustancias químicas peligrosas deben clasificarse, etiquetarse y manejarse de acuerdo con normas de seguridad que minimicen el riesgo para la salud humana y el medio ambiente.

A su vez, Uruguay está adherido al Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (COP) (Stockholm-Convention, 2025). Dicho convenio es un tratado mundial para proteger la salud humana y el medio ambiente de las sustancias químicas que permanecen intactas en el medio ambiente durante largos períodos, se distribuyen geográficamente de forma amplia, se acumulan en el tejido graso de los seres humanos y la vida silvestre y tienen efectos nocivos para la salud humana o el medio ambiente. Dicho acuerdo prohíbe y/o elimina la producción y el uso, así como la importación y exportación, de ciertos COP producidos intencionalmente mientras a otros COP los restringe. El Convenio promueve también el uso de las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales para prevenir las liberaciones de COP al medio ambiente. El pentaclorofenol es considerado un COP, por lo cual en la convención de Estocolmo se buscaron alternativas para su sustitución (UNEP, 2021).

Por otra parte, de acuerdo al Decreto 157/018, para la realización del despacho de importación de sustancias químicas se requiere la presentación de una licencia emitida por la Dirección Nacional de Industrias del Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM, 2018). Tratándose de productos peligrosos, el importador deberá acreditar que cuenta con las autorizaciones y habilitaciones legales que se exigen en el país a las empresas nacionales que fabrican, acopian, depositan, distribuyen y/o realizan operaciones de comercialización de dichos productos, cualquiera sea el volumen que se pretende ingresar al país, incluyendo los planes de contingencia que se requieren para el producto de que se trate.

Respecto al registro de este tipo de productos, por considerarse productos con capacidad biocida, los preservantes de madera deben inscribirse en el Registro de Productos Fitosanitarios, el cual es llevado a cabo por la Dirección General de Servicios Agrícolas (DGSA), dependiente del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP). La DGSA establece que todos los productos que contengan sustancias activas que puedan afectar la salud o el ambiente deben registrarse y aprobarse antes de su comercialización.

En cuanto al criterio de clasificación a utilizar para este tipo de productos, el marco normativo en Uruguay establece que los productos preservantes de madera deben seguir las pautas de clasificación y etiquetado del Sistema Globalmente Armonizado (GHS) para el etiquetado de productos químicos peligrosos. Esto incluye advertencias claras sobre los riesgos para la salud y el medio ambiente.

Sin embargo no existe en Uruguay un registro especial para preservantes de madera con requerimientos adicionales específicos.

7.3 PROCESO INDUSTRIAL

7.3.1 DISPOSICIONES AMBIENTALES

Las normas ambientales son fundamentales para garantizar que las operaciones de fabricación de madera no dañen el medio ambiente. Estas normas ayudan a controlar las emisiones, los residuos y otros impactos ambientales de las operaciones de fabricación de productos de madera.

7.3.1.1 ESTADOS UNIDOS

En 1970 se crea la 1er agencia de control ambiental del mundo, la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA) de los Estados Unidos, con el fin de salvaguardar los recursos naturales de dicho país frente a contaminantes liberados de diversas actividades antropogénicas. Varios de los objetivos iniciales en la creación de dicha agencia fueron la base para las posteriores leyes para el cuidado de los recursos hídricos y el aire.

La Ley del Aire Limpio (Clean Air Act, CAA) es una ley federal que regula las emisiones atmosféricas de las operaciones industriales, donde se exige a las industrias que obtengan permisos de emisiones e instalen sistemas de control para reducir las emisiones a la atmósfera a niveles aceptables (United States Environmental Protection Agency, 2024). La ley cubre una variedad de contaminantes del aire, incluidas las partículas, el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno.

El CAA se aplica a todas las instalaciones de procesamiento de madera que emiten contaminantes del aire que superan ciertos umbrales. Los umbrales dependen del tipo de instalación y del contaminante específico emitido. La normativa se aplica a las instalaciones que fabrican productos de madera, incluida la madera aserrada, la madera contrachapada, los tableros de partículas, los tableros de virutas orientadas (OSB), así también como determinadas plantas de preservación de la madera. Las instalaciones que emiten menos de 10 toneladas por año de cualquier Contaminante Peligroso para el Aire (Hazardous Air Pollutant, HAP) individual o menos de 25 toneladas por año de todos los HAP combinados están exentas de la regulación (Deskera, 2025).

Las instalaciones de procesamiento de la madera deben cumplir con la regulación del CAA obteniendo un permiso y cumpliendo con los límites de emisión. La solicitud de permiso requiere que la instalación proporcione información sobre los tipos y cantidades de contaminantes emitidos, los dispositivos de control utilizados y el equipo de monitoreo instalado. Los límites de emisión varían según el tipo de contaminante y el tamaño de la instalación. Las industrias de procesamiento de la madera también deben monitorear regularmente sus emisiones y mantener registros de sus emisiones y actividades de cumplimiento.

La sección 112(k)(3)(B) del CAA estableció que la EPA debe identificar al menos 30 HAP que posean el mayor potencial de amenaza contra la salud en áreas urbanas, con el objetivo de disminuir un 75% la probabilidad de la población de contraer cáncer atribuido a HAP emitidos por fuentes industriales estacionarias. La EPA implementó estos requerimientos mediante la Estrategia Integral de Tóxicos al Aire Urbano (Integrated Urban Air Toxics Strategy) donde se identificó algunos rubros industriales donde trabajar y establecer estándares de gestión, como lo es en el rubro de la conservación de la madera. Al desarrollar dichos estándares, la EPA evalúa tecnologías de control y prácticas de gestión para reducir las emisiones de HAP para cada rubro industrial en cuestión. Dentro de dicho análisis la EPA considera los costos e impactos económicos para determinar lo que considera la Tecnología de Control Generalmente Disponible (Generally Available Control Technology, GACT). En el 2023 la EPA terminó la última Revisión de Tecnología (Technology Review, TR) para el área de preservación de maderas reguladas en el marco de los Estándares de Emisiones Nacionales de Contaminantes Peligrosos para el Aire (National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants, NESHAP), donde se determinó que no han ocurrido cambios significativos en lo que refiere a tecnologías de control de emisiones de contaminantes peligrosos para la industria de la preservación de la madera (EPA, 2021).

Los estándares NESHAP son aplicables a cualquier planta de preservación de madera que emite HAP. Sin embargo, los contaminantes (HAP) urbanos para los cual se creó esta categoría son arsénico, cromo, cloruro de metileno y dioxinas (72 FR 16652); por lo cual los estándares NESHAP para preservación de madera solo aplican a las plantas industriales que operan con productos químicos que presentan dichos principios activos (pentaclorofenol, CCA y ACZA). La EPA estima que hay 177 plantas industriales (de un total de 322 plantas en todo Estados Unidos) que usan este tipo de producto preservante y están sujetas a los estándares de GACT. Las demás plantas de preservación de madera usan otros productos químicos que no contienen HAP, o usan creasota que contiene naftaleno, el cual también es considerado un HAP.

Los estándares GACT requieren que las plantas de preservación con tratamiento a presión usen cañerías de recirculación y/o piletas de contención de concreto para contener potenciales derrames de productos químicos. Para las plantas que operan con procesos térmico dicho estándar requiere el uso de tanques de proceso equipados con sistema de lavadores de gases, para capturar potenciales contaminantes y controlar las emisiones al aire. Además, todas estas plantas deben operar de acuerdo con un plan de gestión de operaciones para minimizar las emisiones al aire, incluidas las emisiones de tanques de proceso y otro equipamiento para almacenamiento, manipulación y operaciones de trasvase de producto.

Por otro lado, la Ley de Agua Limpia (Clean Water Act, CWA) regula la descarga de contaminantes en aguas superficiales, incluidos ríos, lagos y arroyos en los Estados Unidos. La ley exige que las industrias obtengan permisos de descarga y cumplan con los estándares de calidad del agua (United States Environmental Protection Agency, 2024). Esto incluye las descargas de las instalaciones de procesamiento de madera que pueden contener contaminantes como virutas de madera, aserrín y productos químicos utilizados en el tratamiento de la madera.

Las instalaciones de procesamiento de madera deben obtener un permiso del Sistema Nacional de Eliminación de Descargas de Contaminantes (National Pollutant Discharge Elimination System, NPDES) de la EPA o una agencia estatal autorizada para descargar contaminantes en aguas superficiales. El permiso NPDES requiere que las industrias cumplan con limitaciones específicas sobre la cantidad de contaminantes que se pueden descargar en el agua. Las industrias también deben implementar las mejores prácticas de gestión para reducir la cantidad de contaminantes descargados en el agua, como la instalación de cuencas de sedimentación para capturar virutas de madera y aserrín. La EPA realiza inspecciones de las instalaciones para garantizar el cumplimiento de las regulaciones de la Ley de Agua, y su incumplimiento puede dar lugar a sanciones.

7.3.1.2 EUROPA

La Directiva sobre las emisiones industriales (2010/75/EU) introduce reglas para prevenir, o en casos donde no es prácticamente posible, reducir, las emisiones industriales de contaminantes al aire, agua y suelo en la UE (European-Union,

2024). Entre las actividades industriales que están incluidas en dicha directiva están la preservación de madera o productos de madera empleando sustancias químicas. La directiva indica que todas las instalaciones industriales deben aplicar las mejores técnicas disponibles para mejorar la eficiencia energética, optimización del manejo y uso del agua y otros recursos, así como en la prevención y manejo de residuos.

A finales del 2020 la UE emite una enmienda de la Directiva 2010/75/UE donde describe las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) para disminuir las emisiones de procesos industriales como el tratamiento de superficies con disolventes orgánicos, incluyendo la conservación de la madera y los productos derivados de la madera utilizando productos químicos orgánicos, como la creosota (Comisión-Europea, 2020). Entre las principales MTD para los procesos de conservación de madera se destacan:

- Elaboración y puesta en marcha de un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) para llevar registro del impacto de las operaciones de la planta industrial sobre el ambiente, con el objetivo de identificar oportunidades de mejora e ir reduciendo de a poco dicho impacto;
- Sustitución de sustancias peligrosas. Evitar o reducir el uso de HAP, y cuando sea posible utilizar conservantes en base acuosa. Realizar una revisión periódica de nuevas tendencias en productos para la preservación de la madera con el fin de identificar si existen nuevos productos con menor impacto ambiental en el mercado;
- Aumento en la eficiencia en el uso de recursos, para reducir así el impacto ambiental y los riesgos asociados al uso de productos químicos para el tratamiento de conservación de la madera, aplicando las siguientes técnicas:

Técnica		Descripción	Aplicabilidad
a)	Uso de un sistema de aplicación de sustancias conservantes eficiente	Los sistemas de aplicación en los que se sumerge la madera en la solución conservante son más eficientes que, por ejemplo, la pulverización. En el caso de los procesos al vacío (sistema cerrado), la eficiencia de la aplicación es casi del 100 %. Al seleccionarse el sistema de aplicación se tienen en cuenta el tipo de uso y el nivel de penetración necesario.	Esta técnica solo es aplicable en las instalaciones nuevas o en caso de mejora importante de una instalación.
b)	Control y optimización del uso de químicos para tratamiento para el uso final específico	Control y optimización del uso de químicos para tratamiento por las siguientes vías: a) pesar la madera o los productos de la madera tanto antes como después de la impregnación; o b) determinar la cantidad de solución conservante tanto durante como después de la impregnación. El uso de químicos para tratamiento se ajusta a las recomendaciones de los proveedores y no conlleva rebasamientos de los requisitos de retención (por ejemplo, los fijados en las normas de calidad de los productos).	Aplicable con carácter general.
c)	Balace de masa de disolvente	Compilar, al menos una vez al año, las entradas y salidas de disolventes orgánicos de una instalación según lo previsto en la parte 7, punto 2, del anexo VII de la Directiva 2010/75/UE.	Solo aplicable a las instalaciones que utilizan químicos para tratamiento en base disolvente o creosota.
d)	Medición y ajuste de la humedad de la madera antes del tratamiento	Se mide la humedad de la madera antes del tratamiento (por ejemplo, al medir la resistencia eléctrica o por peso) y se ajusta en caso necesario (por ejemplo, mediante un secado adicional de la madera) con el fin de optimizar el proceso de impregnación y garantizar la calidad del producto necesario.	Solamente se aplica en el caso de que se requiera una humedad de la madera específica.

- Reducción de las emisiones procedentes del envío, almacenamiento y manipulación de los productos químicos para la conservación de la madera, aplicando las siguientes técnicas:

Técnica		Descripción
a)	Sistema de recirculación de vapor	También llamado equilibrado de vapores. Los vapores de disolventes o creosota que se escapan del tanque de recepción durante el llenado se recuperan y devuelven al tanque o al camión desde el que se suministra el líquido.
b)	Captura del aire de escape	Los vapores de disolventes o creosota que se escapan del tanque de recepción durante el llenado se recuperan y canalizan a una unidad de tratamiento, por ejemplo, un filtro de carbón activo o una unidad de oxidación térmica.
c)	Técnicas para reducir las pérdidas por evaporación debido al calentamiento de los químicos almacenados	En el caso de que la exposición a la luz del sol pudiera conllevar la evaporación de los disolventes y la creosota almacenados en tanques de almacenamiento no subterráneos, los tanques se cubren con un tejado o se recubren con una pintura de color claro para reducir el calentamiento de los disolventes y la creosota almacenados.
d)	Asegurado de las conexiones de suministro	Las conexiones de suministro a los tanques de almacenamiento situados en la zona confinada se aseguran y cierran cuando no se encuentran en uso.
e)	Técnicas para evitar los desbordamientos durante el bombeo	Esto incluye garantizar lo siguiente: — que la operación de bombeo está supervisada; — que, para las cantidades más grandes, los tanques de almacenamiento de gran capacidad disponen de alarmas sonoras u ópticas de alto nivel, con sistemas de cierre si fuera necesario.
f)	Contenedores de almacenamiento cerrados	Uso de contenedores de almacenamiento cerrados para los químicos para tratamiento.

- Optimización de procesos de aplicación de sustancias conservantes, para evitar las fugas accidentales y las emisiones de químicos. Para tratamiento derivadas de procesos sin presión, se debe contar con piletas de contención capaces de almacenar la cantidad de producto de un eventual derrame. Para reducir las emisiones de aerosoles procedentes de los químicos en base a agua utilizados para la conservación de madera, se recomienda confinar los procesos de pulverizado, recoger el exceso de pulverización y reutilizarlo para elaborar la solución conservante. Por último, para evitar o reducir las emisiones de químicos procedentes de procesos de tratamiento de madera a presión (autoclaves), la MTD recomienda utilizar las siguientes técnicas:

Técnica		Descripción
a)	Controles del proceso para impedir el funcionamiento cuando la puerta del tanque de tratamiento no esté cerrada y sellada	Se cierra y sella la puerta del tanque de tratamiento una vez que este se haya llenado y antes de que el tratamiento tenga lugar. Se dispone de controles del proceso para evitar que los tanques de tratamiento entren en funcionamiento cuando la puerta no esté cerrada y sellada.
b)	Controles del proceso para evitar que el tanque de tratamiento se abra mientras esté presurizado o contenga solución conservante	Los procesos de control informan sobre la presión y sobre si el tanque de tratamiento contiene líquido. Impiden que el tanque de tratamiento pueda abrirse mientras esté presurizado o contenga líquido.
c)	Colocación de una cerradura (catch-lock) en la puerta del tanque de tratamiento	La puerta del tanque de tratamiento está equipada con una cerradura (catch-lock) para evitar la salida de líquidos en caso de que deba abrirse debido a una emergencia (por ejemplo, si se rompe el cierre de estanquidad de la puerta). La cerradura (catch-lock) permite que se abra parcialmente la puerta para liberar la presión sin que salgan los líquidos.
d)	Uso y mantenimiento de válvulas de seguridad	Los tanques de tratamiento están equipados con válvulas de seguridad para evitar la sobrepresión. Los vertidos de las válvulas se canalizan a un tanque con capacidad suficiente. Las válvulas de seguridad se inspeccionan de manera regular (por ejemplo, cada seis meses) para buscar signos de corrosión, contaminación o instalación incorrecta y se limpian o reparan en caso necesario.
e)	Control de las emisiones atmosféricas de los gases de escape de la bomba de vacío	Se trata (por ejemplo, en un separador de vapor y líquidos) el aire extraído de los tanques de tratamiento a presión (es decir, la salida de la bomba de vacío).
f)	Reducción de las emisiones atmosféricas al abrirse el tanque de tratamiento	Se dispone de suficiente tiempo para el goteo y la condensación entre el periodo de despresurización y la apertura del tanque de tratamiento.
g)	Aplicación de un vacío final para eliminar de la superficie de la madera tratada el exceso de químicos para tratamiento	Para evitar el goteo, se aplica un vacío final en el tanque de tratamiento antes de abrirlo para eliminar el exceso de químicos para tratamiento de la superficie de la madera tratada. Puede que no sea necesario aplicar un vacío final si se garantiza la eliminación del exceso de químicos para tratamiento de la superficie de la madera tratada mediante la aplicación de un vacío inicial adecuado (por ejemplo, menos de 50 mbar).

- Minimización del potencial de contaminación del suelo o el agua subterránea a través del almacenamiento provisional de la madera recién tratada en zona confinada, hasta que se considere seca, con el fin de que el exceso de químicos para el tratamiento gotee dentro de un área donde drene hacia una fosa de contención;

- Monitoreo de posible presencia de contaminantes en las aguas superficiales aledañas a la planta de tratamiento, utilizando alguna de las siguientes normas:

Sustancia/parámetro	Norma(s)
Biocidas ⁽¹⁾	Dependiendo de la composición de los productos biocidas, es posible que se disponga de normas EN
Cu ⁽²⁾	Se dispone de varias normas EN (por ejemplo, EN ISO 11885, EN ISO 17294-2 o EN ISO 15586)
Disolventes ⁽³⁾	Se dispone de normas EN para algunos disolventes (por ejemplo, EN ISO 15680)
HAP ⁽⁴⁾	EN ISO 17993
Benzo[a]pireno ⁽⁵⁾	EN ISO 17993
IH	EN ISO 9377-2

⁽¹⁾ Se monitorizan sustancias concretas en función de la composición de los productos biocidas utilizados durante el proceso.

⁽²⁾ Esta monitorización solamente es aplicable si se utilizan compuestos de cobre en el proceso.

⁽³⁾ Esta monitorización solo es aplicable a las instalaciones que utilizan químicos para tratamiento en base disolvente. Se monitorizan sustancias concretas en función de los disolventes utilizados durante el proceso.

⁽⁴⁾ Esta monitorización solo es aplicable a las instalaciones que realizan tratamientos con creosota.

- Monitoreo (una vez cada 6 meses) de posible presencia de contaminantes en las aguas subterráneas aledañas a la planta de tratamiento, utilizando alguna de las siguientes normas:

Sustancia/parámetro ⁽¹⁾	Norma(s)
Biocidas ⁽²⁾	Dependiendo de la composición de los productos biocidas, es posible que se disponga de normas EN
As	Se dispone de varias normas EN (por ejemplo, EN ISO 11885, EN ISO 17294-2 o EN ISO 15586)
Cu	
Cr	
Disolventes ⁽³⁾	Se dispone de normas EN para algunos disolventes (por ejemplo, EN ISO 15680)
HAP	EN ISO 17993
Benzo[a]pireno	EN ISO 17993
IH	EN ISO 9377-2

⁽¹⁾ Esta monitorización podría no ser aplicable en el caso de que la sustancia de que se trate no se utilice en el proceso o si se ha demostrado que el agua subterránea no está contaminada con dicha sustancia.

⁽²⁾ Se monitorizan sustancias concretas en función de la composición de los productos biocidas utilizados durante el proceso.

⁽³⁾ Esta monitorización solo es aplicable a las instalaciones que utilizan químicos para tratamiento en base disolvente. Se monitorizan sustancias concretas en función de los disolventes utilizados durante el proceso.

Si se demuestra mediante una evaluación de riesgo que los niveles de contaminación son suficientemente bajos y estables, la frecuencia de monitoreo puede reducirse a una vez cada 2 años.

- Monitoreo (1 vez al año) de posible presencia de contaminantes en las emisiones de los gases residuales de la planta de tratamiento de maderas, utilizando alguna de las siguientes normas:

Parámetro	Proceso	Norma(s)	Monitorización asociada a
COVT ⁽¹⁾	Conservación de la madera y los productos de la madera usando creosota y químicos para tratamiento en base disolvente	EN 12619	MTD 49, MTD 51
HAP ⁽¹⁾ ⁽²⁾	Conservación de la madera y los productos de la madera usando creosota	Ninguna norma EN disponible	MTD 51
NOX ⁽³⁾	Conservación de la madera y los productos de la madera usando creosota y químicos para tratamiento en base disolvente	EN 14792	MTD 52
CO ⁽³⁾		EN 15058	

⁽¹⁾ En la medida de lo posible, las mediciones se efectúan en el estado de emisión más elevado previsto en condiciones normales de funcionamiento.

⁽²⁾ Esto incluye: acenafieno, acenafileno, antraceno, benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno, benzo(b)fluoranteno, benzo(g,h,i)perileno, benzo(k)fluoranteno, criseno, dibenzo(a,h)antraceno, fluoranteno, fluoreno, indeno(1,2,3-cd)pireno, naftaleno, fenantreno y pireno.

⁽³⁾ Esta monitorización solo es aplicable a las emisiones procedentes del tratamiento térmico de los gases de salida.

- Reducción de las emisiones al suelo y aguas subterráneas, utilizando alguna de las siguientes técnicas:

	Técnica	Descripción
a)	Confinamiento de las instalaciones y los equipos	Las partes de la instalación en que se almacenan o manipulan químicos para tratamiento, es decir, la zona de almacenamiento de dichos productos, las zonas de tratamiento, acondicionamiento postratamiento y almacenamiento provisional (que incluyen el tanque de tratamiento, el tanque de trabajo, las instalaciones de descarga/recogida, la zona de goteo/secado y la zona de enfriamiento), las tuberías y los conductos por los que pasan químicos para tratamiento y las instalaciones de (re)acondicionamiento de la creosota, están confinadas. Los medios de confinamiento tienen superficies impermeables, son resistentes a los químicos para tratamiento y disponen de suficiente capacidad para capturar y albergar los volúmenes manipulados o almacenados en la instalación o los equipos. También pueden usarse bandejas de goteo (fabricadas con materiales resistentes a los químicos para tratamiento) como contenedores locales para la recogida y la recuperación de gotas o vertidos de químicos para tratamiento procedentes de equipos o procesos críticos (es decir, las válvulas, las entradas/salidas de los tanques de almacenamiento, los tanques de tratamiento, los tanques de trabajo, las zonas de descarga/recogida, la manipulación de madera recién tratada y la zona de enfriamiento/secado). Se recogen los líquidos de los medios de confinamiento y las bandejas de goteo con el fin de recuperar los químicos para tratamiento para su reutilización en el sistema de químicos para tratamiento. El lodo generado en el sistema colector se elimina como residuo peligroso.
b)	Suelos impermeables	Los suelos de las zonas que no están confinadas y en las que podrían producirse goteos, derrames, vertidos accidentales o filtraciones de químicos para tratamiento son impermeables para las sustancias de que se trate (por ejemplo, almacenamiento de la madera tratada en suelos impermeables en caso de que así lo requiera la autorización en virtud del R&B para la sustancia conservante para madera utilizada para el tratamiento). Se recogen los líquidos de los suelos para recuperar los químicos para tratamiento con miras a su reutilización en el sistema de químicos para tratamiento. El lodo generado en el sistema colector se elimina como residuo peligroso.

c)	Sistemas de alerta para los equipos identificados como «críticos»	Los equipos «críticos» (véase la MTD 30) disponen de sistemas de alerta que informan de los errores de funcionamiento.
d)	Prevención y detección de fugas procedentes del almacenamiento y los conductos subterráneos para sustancias peligrosas/nocivas y mantenimiento de registros	Se reduce al mínimo la utilización de componentes subterráneos. En el caso de que se utilicen componentes subterráneos para el almacenamiento de sustancias peligrosas/nocivas, existe un sistema de confinamiento secundario (por ejemplo, confinamiento con pared doble). Los componentes subterráneos están equipados con dispositivos de detección de fugas. Se lleva a cabo una monitorización regular del almacenamiento y los conductos subterráneos basada en el riesgo para identificar las posibles fugas; cuando así resulta necesario, se reparan los equipos que tienen fugas. Se mantiene un registro de incidentes que podrían causar la contaminación del suelo o de las aguas subterráneas.
e)	Inspección y mantenimiento regulares de las instalaciones y los equipos	Se realizan una inspección y un mantenimiento regulares de las instalaciones y los equipos para garantizar un funcionamiento adecuado. En concreto, esto implica verificar la integridad o la ausencia de fugas de válvulas, bombas, tuberías, tanques, tanques de presión, bandejas de goteo y medios de confinamiento, y el correcto funcionamiento de los sistemas de alerta.
f)	Técnicas para evitar la contaminación cruzada	Se evita la contaminación cruzada (es decir, la contaminación de zonas de las instalaciones que normalmente no entran en contacto con los químicos para tratamiento) al utilizar técnicas adecuadas, como las siguientes: — diseño de las bandejas de goteo de modo que las carretillas elevadoras no entren en contacto con las superficies de las bandejas que podrían estar contaminadas; — diseño de los equipos de carga (usados para sacar la madera tratada del tanque de tratamiento) de modo que se evite la transferencia de químicos para tratamiento; — uso de un sistema de grúa para manipular la madera tratada; — empleo de vehículos de transporte específicos para las zonas que podrían estar contaminadas; — acceso restringido a las zonas que podrían estar contaminadas; — uso de pasarelas arenosas.

- Evitar o, cuando no sea posible, reducir las emisiones al agua y gestión de aguas residuales, según las siguientes técnicas:

Técnica	Descripción	Aplicabilidad
a) Técnicas para evitar la contaminación de las aguas pluviales y la escorrentía superficial	Las aguas pluviales y la escorrentía superficial se mantienen separadas de las zonas en que se almacenan o manipulan los químicos para tratamiento, de las zonas en que se almacena la madera recientemente tratada y del agua contaminada. Esto se logra al aplicar, como mínimo, las siguientes técnicas: — canales de drenaje o un bordillo de aislamiento externo alrededor de la instalación; — techar con canaletas las zonas en que se almacenan o manipulan químicos para tratamiento [es decir, la zona de almacenamiento de químicos para tratamiento; las zonas de tratamiento, acondicionamiento post tratamiento y almacenamiento provisional; las tuberías y los conductos por los que pasan químicos para tratamiento; y las instalaciones de (re) acondicionamiento de la creosota]; — protección frente al clima (por ejemplo, cubiertas o toldos) para el almacenamiento de la madera tratada en caso de que así lo prevea la autorización con arreglo al RfB para la sustancia conservante para madera utilizada para el tratamiento.	En el caso de las instalaciones existentes, la aplicabilidad de los canales de drenaje y del bordillo de aislamiento exterior podría verse limitada por el tamaño de la superficie de la instalación.
b) Recogida de la escorrentía superficial que podría estar contaminada	Recogida por separado de la escorrentía superficial de zonas que podrían estar contaminadas con químicos para tratamiento. Las aguas residuales recogidas no se vierten hasta que se han adoptado medidas adecuadas, como la monitorización (véase la MTD 4.6), el tratamiento [véase la MTD 4.7, letra e)] o la reutilización [véase la MTD 4.7, letra c)].	Aplicable con carácter general.
c) Uso de la escorrentía superficial que podría estar contaminada	Tras su recogida, la escorrentía superficial que podría estar contaminada se utiliza para la preparación de soluciones conservantes para madera en base agua.	Solo aplicable a las instalaciones que utilizan químicos para tratamiento en base agua. La aplicabilidad podría verse limitada debido a requisitos de calidad para su uso previsto.
d) Reutilización del agua usada para limpiar	Se recupera el agua usada para limpiar los equipos y los contenedores y se reutiliza para la preparación de soluciones conservantes para madera en base agua.	Solo aplicable a las instalaciones que utilizan químicos para tratamiento en base agua.
e) Tratamiento de aguas residuales	En el caso de que se detecte o quepa prever la contaminación de la escorrentía superficial o del agua utilizada para la limpieza recogida y no sea posible utilizarlas, las aguas residuales se tratan en la instalación de tratamiento de aguas residuales que corresponda (en la instalación o fuera de ella).	Aplicable con carácter general.
f) Eliminación como residuos peligrosos	En el caso de que se detecte o quepa prever la contaminación de la escorrentía superficial o del agua utilizada para la limpieza recogida y no sea posible tratarlas o usarlas, la escorrentía superficial o el agua utilizada para la limpieza recogida se eliminan como residuo peligroso.	Aplicable con carácter general.

- Reducción de las emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) a la atmósfera procedentes del proceso de conservación de madera utilizando químicos en base a disolvente orgánico. Para ello se recomienda confinar los equipos de proceso para contener posibles fugas, extraer los gases de salida de la bomba de vacío y enviarlos a un sistema de tratamiento de gases. Para reducir las emisiones atmosféricas de COV y olores procedentes de la conservación de madera con creosota, se recomienda utilizar aceites de impregnación de baja

volatilidad, es decir, creasota de grado C. Para reducir los COV procedentes de la conservación de madera usando creasota, la MTD es confinar los equipos emisores, extraer los gases de salida y utilizar alguna de las siguientes técnicas de tratamiento de gases:

Técnica		Descripción	Aplicabilidad
a)	Oxidación térmica	Véase la MTD 15, letra i). El calor de escape puede recuperarse mediante intercambiadores de calor.	Aplicable con carácter general.
b)	Envío de los gases de salida a una instalación de combustión	Se envía una parte o la totalidad de los gases de salida como aire de combustión y combustible adicional a una instalación de combustión [incluidas instalaciones de PCCE (producción combinada de calor y electricidad)] utilizada para la producción de vapor o electricidad.	No se aplica a los gases de salida que contengan las sustancias a las que se refiere el artículo 59, apartado 5, de la DEI. La aplicabilidad podría verse limitada por motivos de seguridad.
c)	Adsorción utilizando carbón activo	Los compuestos orgánicos se adsorben en la superficie de carbón activo. Los compuestos adsorbidos podrán desorberse posteriormente, por ejemplo, con vapor (generalmente in situ), para su reutilización o eliminación y se reutiliza el adsorbente.	Aplicable con carácter general.
d)	Absorción utilizando un líquido apropiado	Uso de un líquido adecuado para eliminar los contaminantes de los gases de salida mediante absorción, en concreto los compuestos solubles.	Aplicable con carácter general.
e)	Condensación	Técnica para eliminar los compuestos orgánicos consistente en reducir la temperatura por debajo de sus puntos de rocío para que los vapores se licuen. Se utilizan diferentes refrigerantes en función del intervalo de temperaturas operativas necesario, como agua de refrigeración, agua fría (generalmente en torno a 5 °C), amoníaco o propano. La condensación se utiliza en combinación con otra técnica de reducción de las emisiones.	La aplicabilidad de esta técnica puede verse limitada si la demanda de energía para la recuperación es excesiva debido al bajo contenido de COV.

7.3.1.3 NUEVA ZELANDA

La industria de la preservación de la madera está regida por la Ley de Sustancias Peligrosas y Nuevos Organismos (Hazardous Substances & New Organisms, HSNO). La Ley HSNO es una legislación integral en Nueva Zelanda diseñada para proteger el medio ambiente y la salud humana de los riesgos potenciales que plantean las sustancias peligrosas y los nuevos organismos. Establece las reglas y regulaciones para gestionar y controlar el uso, almacenamiento, transporte y eliminación de sustancias peligrosas, como los productos químicos utilizados en el tratamiento de la madera, así como la introducción y gestión de nuevos organismos. El cumplimiento de la Ley HSNO es crucial para garantizar que la industria de la madera tratada opere de manera segura y responsable, minimizando los riesgos tanto para las personas como para el medio ambiente.

Respecto a las obligaciones legales y los requisitos de seguridad para las plantas de preservación de madera, la Ley HSNO exige algunos requisitos para garantizar operaciones seguras dentro de la industria de la madera tratada (NZTPC, 2025).

Dado que las plantas de tratamiento con CCA, ACQ y CuAz (soluciones acuosas) no manejan ni utilizan sustancias inflamables, están exentas del requisito de obtener un "Certificado de Prueba de Ubicación".

Sin embargo, el CCA se considera altamente tóxico, lo que significa que pueden causar un daño significativo a la salud si no se manejan correctamente. Debido a su toxicidad, el uso de estos productos está regulado bajo la Ley HSNO.

Un "manipulador aprobado" es una persona que ha recibido formación y certificación específicas para gestionar y utilizar de manera segura estas sustancias peligrosas. La ley exige que un manipulador aprobado esté involucrado en el uso de estos productos químicos, pero esto no significa que cada persona que los manipule deba estar certificada. Cada planta de impregnación debe contar con al menos un manipulador aprobado para guiar y supervisar a quienes trabajan con estos químicos, garantizando que se sigan prácticas seguras.

El requisito de seguimiento establece que el movimiento y uso de estos productos químicos tóxicos deben ser documentados y monitoreados. Esto implica llevar registros detallados sobre dónde se almacenan los químicos, cuándo y cómo se utilizan, y quién los manipula. Este seguimiento ayuda a prevenir el mal uso, garantiza que se sigan los procedimientos de seguridad y proporciona un registro claro en caso de cualquier incidente. Esta regulación busca asegurar que el CCA se maneje de manera segura, minimizando el riesgo tanto para las personas como para el medio ambiente.

Por otro lado, la legislación también exige que los sistemas de contenedores estacionarios con una capacidad superior a 5000 litros requieren certificación. Un certificador de pruebas, aprobado para tanques estacionarios, debe evaluar estos sistemas. Los principales requisitos de cumplimiento incluyen: gestión de presión de emergencia; indicadores de nivel; sistema de extinción de incendios; señalización y mantenimiento de registros. A su vez, las medidas de contención secundaria, como las áreas con diques de contención, son esenciales para gestionar sustancias que puedan filtrarse, derramarse o dispersarse desde sus contenedores primarios.

7.3.1.4 BRASIL

El Instituto Brasileño del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales (IBAMA) regula el impacto ambiental de los productos químicos, incluyendo los preservantes de madera. La legislación ambiental brasileña se enfoca en garantizar que los productos utilizados no dañen el medio ambiente, los suelos

o los recursos hídricos. Los preservantes de madera deben cumplir con criterios estrictos sobre el manejo de residuos y la disposición final de los productos. El IBAMA es el responsable de la evaluación de los posibles efectos ambientales de los preservantes de madera, asegurando que cumplan con los estándares de seguridad ambiental antes de ser aprobados para su uso.

Los productos que contienen sustancias químicas peligrosas deben ser gestionados adecuadamente, desde su uso en el tratamiento de la madera hasta la disposición de los residuos, para evitar la contaminación del suelo y del agua. El IBAMA es la institución encargada del control de la gestión de dichos residuos peligrosos.

El Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento (MAPA) también regula el uso de preservantes de madera en el contexto de productos agroindustriales. Si los preservantes son utilizados para proteger la madera en productos relacionados con la agricultura, el MAPA puede exigir normativas fitosanitarias adicionales para garantizar que no afecten negativamente el suelo o los productos agrícolas.

Por otro lado, el Ministerio de Trabajo y Empleo (MTE), a través de las Normas Reguladoras (NR), establece las reglas sobre la salud y seguridad de los trabajadores que manipulan preservantes de madera. Esto incluye la NR 15, que regula actividades y operaciones insalubres, y la NR 6, que especifica los equipos de protección personal (EPP) necesarios para trabajadores expuestos a productos químicos peligrosos. Los empleadores deben garantizar que los trabajadores utilicen los EPP adecuados y que reciban capacitación sobre el uso seguro de los preservantes de madera. La exposición prolongada a sustancias químicas debe ser minimizada y monitorizada, con evaluaciones periódicas de las condiciones de trabajo.

En resumen, los preservantes de madera en Brasil están regulados por varias agencias, como ANVISA, IBAMA, MAPA, así como el MTE, que aseguran que los productos sean seguros para el uso humano, ambientalmente responsables y manejados adecuadamente en el entorno laboral. Los productos deben estar registrados y cumplir con normativas estrictas de etiquetado, seguridad y manejo de residuos, y ciertas sustancias peligrosas están restringidas o prohibidas.

7.3.1.5 URUGUAY

Las plantas de preservación de madera deben cumplir con distintas normativas relacionadas con la Ley de Protección del Medio Ambiente Ley N.º 17.283 del año 2000. Dicha ley reglamenta el artículo N.º 47 de la Constitución, que declara de interés general la protección del medio ambiente. Regula las bases de la política nacional en dicha materia y establece las competencias del Ministerio

de Ambiente (MA), antes el MVOTMA, para prevenir, impedir o disminuir la afectación o riesgo de afectación del ambiente derivada de cualquier actividad humana.

La Ley N° 16.466 del año 1994 establece la metodología de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) como un instrumento preventivo de gestión ambiental. El Decreto N° 349/005 establece las actividades, construcciones u obras que quedan sujetas a la obtención de la Autorización Ambiental Previa (AAP) para habilitar la instalación de dicho emprendimiento, así también como la Autorización Ambiental de Operación (AAO) para la puesta en marcha de determinados complejos industriales, y la Autorización Ambiental Especial (AAE) para complejos industriales que ya se encontraran en operación al momento de entrar en vigor dicho decreto. Debido a la peligrosidad de las sales de CCA, las plantas de impregnación de madera quedan sujetas al Decreto N° 349/005, por lo que deben tramitar su correspondiente autorización ambiental ante el organismo de contralor. Tanto la AAP, AAO y AAE deben ser solicitadas ante la Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental (DINACEA) del MA.

A su vez, la DINACEA es el órgano encargado de controlar potenciales focos de contaminación de las instalaciones industriales al ambiente. En el caso de las plantas de impregnación de madera con sales de CCA por el método de vacío-presión-vacío, se debe intentar reducir por todos los medios posibles lixiviados de solución preservante a los suelos alrededor de él autoclave de impregnación. Para ello la planta industrial debe contar con superficies de hormigón capaces de poder almacenar la madera a la salida de él autoclave mientras se seca, y que la solución remanente escurra a una pileta de contención para recolectar la solución preservante y poder reutilizarla. En casos excepcionales en que existan pérdidas de solución al ambiente, se debe intentar absorber lo máximo posible del preservante para evitar su mayor dispersión al suelo y/o cuerpos de agua. Los materiales contaminados con solución de CCA deben ser tratados como residuos peligrosos.

A los efectos de minimizar el impacto ambiental de las plantas de impregnación con CCA, se ha generado por iniciativa del entonces llamado Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente una *“Guía de Buenas Practicas en Impregnación de Madera. Tomo 2. Gestión Ambiental y Producción más Limpia* (COOPERACION TECNICA MERCOSUR (SGT6) ; GTZ, 2007)

Por otro lado, las plantas de impregnación de madera deben cumplir con la normativa nacional que aborda la seguridad en el uso de estos productos por parte de los trabajadores en la industria maderera. La legislación laboral, a través del Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (MTSS), exige que se tomen medidas para minimizar la exposición de los trabajadores a productos químicos peligrosos, basándose en las recomendaciones mencionadas en la *“Guía de Buenas Prácticas para la Impregnación de Madera”* (COOPERACION TECNICA MERCOSUR (SGT6) ; GTZ, 2007).

7.3.2 DISPOSICIÓN FINAL

7.3.2.1 ESTADOS UNIDOS

La Ley de Recuperación y Conservación de Recursos (Resource Conservation and Recovery Act, RCRA) es una ley federal que regula la gestión de residuos peligrosos en Estados Unidos. Exige a los fabricantes que identifiquen, gestionen y eliminen los residuos peligrosos de forma segura y respetuosa con el medio ambiente (EPA, 2025).

Las industrias de procesamiento de la madera deben determinar si los residuos que generan son peligrosos según las normas de la RCRA. Si los residuos cumplen con la definición de residuos peligrosos, deben gestionarse y eliminarse de acuerdo con los requisitos de la RCRA, incluido el etiquetado, el almacenamiento y la eliminación adecuados.

Los fabricantes de productos de madera deben mantener registros detallados de sus prácticas de generación, manipulación y eliminación de residuos, así como proporcionar informes periódicos a las agencias reguladoras.

Las instalaciones que generan, tratan, almacenan o eliminan residuos peligrosos deben solicitar permisos de gestión de la RCRA. Los fabricantes de productos de madera deben obtener los permisos necesarios antes de poder operar.

La RCRA alienta a los fabricantes de productos de madera a minimizar la cantidad de residuos que generan. Al implementar medidas de reducción de residuos, las industrias de la madera pueden reducir sus costos de eliminación de residuos y mitigar su impacto ambiental.

La EPA y los estados autorizados pueden hacer cumplir las normas de la RCRA mediante inspecciones, sanciones y multas. Los fabricantes de madera que infrinjan las normas de la RCRA pueden enfrentarse a multas importantes y acciones legales.

La Ley de Control de Sustancias Tóxicas (Toxic Substances Control Act, TSCA) es una ley federal que regula la fabricación, distribución y uso de sustancias químicas tóxicas en los Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency, 2024). Exige a los fabricantes que envíen información sobre las sustancias químicas nuevas y que obtengan la aprobación antes de introducirlas en el mercado.

La TSCA se promulgó en 1976 y está administrada por la EPA, que tiene la autoridad de exigir pruebas, registros y presentación de informes sobre sustancias químicas.

Los productos de madera pueden contener sustancias químicas, como adhesivos, revestimientos y acabados, que están sujetos a la regulación de la TSCA.

En virtud de la TSCA, los fabricantes de sustancias químicas deben enviar avisos previos a la fabricación (Previous Manufacturing Note, PMN) a la EPA antes de la producción, a menos que la sustancia esté específicamente exenta.

La EPA puede regular una sustancia química si determina que presenta un riesgo irrazonable para la salud humana o el medio ambiente. La TSCA también prevé la regulación de las sustancias químicas existentes mediante el uso de órdenes, como órdenes de prueba y órdenes de recopilación de información.

Además de regular las sustancias químicas, la TSCA también regula la exportación de determinadas sustancias químicas, incluidas las que se utilizan en la fabricación de madera, y exige la certificación de cumplimiento.

7.3.2.2 EUROPA

En la Europa la separación de residuos peligrosos domiciliarios (o asimilables a domiciliarios) está reglamentada por el documento 2020/C 375/01 del Diario Oficial de la Comisión Europea (Comisión-Europea, 2020) (Comisión-Europea, 2020). Este reglamento abarca los casos de residuos de madera que se generan como resultado de obras de renovación y reparación en hogares, tanto para elementos estructurales como no estructurales. En muchos casos dicha madera puede estar impregnada con conservantes químicos para evitar su deterioro. A pesar de que la UE ha limitado el uso de preservantes como el CCA, la creosota y el pentaclorofenol, aún sigue siendo necesario realizar una correcta disposición final de piezas de madera tratada con dichos productos. Dicho reglamento enlista a los residuos de madera que contienen sustancias peligrosas, de origen doméstico, con el código 20 01 37*. Dicho código de residuo también considera los residuos de madera tratada proveniente de otros usos no domiciliarios, como pueden ser los durmientes de vías de tren tratados con creosota o postes tratados con CCA. Por lo general, los residuos de madera tratada deben ser llevados a un sitio donde se realice la correcta gestión de estos. Según dicho reglamento, la incineración es el método preferido de gestión de los residuos de madera tratada con CCA, creosota, y otros productos químicos. Para un correcto tratamiento de dichos residuos, la planta de incineración debe contar con un sistema de control de emisiones atmosféricas para asegurar un bajo nivel de contaminantes (en especial arsénico) en los gases de chimenea.

7.3.2.3 CHILE

En Chile la disposición final de residuos peligrosos está regulada por el Decreto 148/ 2004, donde se describen las pautas para un correcto manejo de dichos residuos (Ministerio-de-Salud-de-Chile, 2004). Según dicha normativa, las sales de CCA, envases contaminados, o residuos de madera tratada entrarían dentro de la categoría de residuos peligrosos por contener cierta cantidad de Arsénico y/o Cromo. Para el caso de contaminantes inorgánicos (como el caso de las sales de CCA), el decreto indica la necesidad de estabilizar dichos componentes mediante la técnica de solidificación con cemento, para así evitar posibles lixiviados tanto de Cromo como de Arsénico. En el caso de los tanques de solución preservante, una vez vaciados de la solución preservante, los tanques deben ser lavados. Se recomienda realizar un triple lavado de los mismos, y el agua contaminada procedente de dichos lavados debe ser reutilizada en planta para la formulación de la solución final preservante a aplicar en el autoclave mediante proceso Bethel.

7.3.2.4 URUGUAY

La disposición final de productos químicos o envases que contuvieron preservantes de madera también está regulada para evitar la contaminación, principalmente mediante el Decreto N° 182/013, donde se establece la obligatoriedad de presentar un Plan de Gestión de Residuos Sólidos (PGRS) a todas las actividades industriales. El objetivo del presente reglamento es establecer el marco para una gestión ambientalmente adecuada de los residuos sólidos industriales y de otros generados en actividades asimiladas, atendiendo a todos los aspectos que hacen a su gestión integral, incluyendo la generación, clasificación, almacenamiento, transporte, reciclado, valorización, tratamiento y disposición final. En particular, la obligatoriedad de presentación del PGRS fue entrando en vigor incrementalmente, iniciando su aplicación en los grandes generadores industriales y las industrias donde se generan residuos peligrosos, como es el caso de los residuos relacionados con la impregnación de maderas con sales de CCA. Dichos residuos deben ser gestionados por gestores de residuos autorizados por la DINACEA. El objetivo principal del PGRS debería ser minimizar la generación de residuos peligrosos, como es el caso de materiales contaminados con CCA. Finalmente, los residuos contaminados con CCA se inmovilizan y envían a un sitio de disposición final capaz de gestionarlos (en Uruguay, el único sitio de disposición final autorizado para este tipo de residuos es gestionado por la Cámara de Industrias del Uruguay).

Por último pero no menos importante, las plantas de impregnación de madera también deben cumplir con la normativa nacional que aborda la seguridad en el uso de estos productos por parte de los trabajadores en la industria maderera. La legislación laboral, a través del Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (MTSS), exige que se tomen medidas para minimizar la exposición de los trabajadores a productos químicos peligrosos.

8 ANALISIS COMPARATIVO

8.1 PRODUCTOS QUÍMICOS

8.1.1 Valoraciones ambientales

La comparación de los preservantes desde un punto de vista ambiental es compleja, debida a los múltiples parámetros involucrados. A esos efectos se presenta la Tabla 19, que tiene como objetivo dar información sobre algunos de los preservantes de madera de uso más frecuente, específicamente de propiedades que inciden en su impacto ambiental y en la salud humana. Dicha información puede considerarse como un análisis de fortalezas y debilidades para esta dimensión de la sostenibilidad, en tanto las respectivas amenazas y oportunidades que serían necesarias para completar un análisis de FODA

estarían más por el lado de las normativas que limiten su uso y por el desarrollo de mercados con preferencia por productos más “verdes”, respectivamente. La tabla se puede interpretar en forma simplificada según una escala de colores (de verde a rojo) asignada a cada parámetro y explicada más adelante.

No se incluyen en el análisis los preservantes con arsénico, por el objetivo global de dejar de usarlos. Hay evidencia suficiente para demostrar que esta sustancia causa cáncer en humanos, lo que lo ubica en el Grupo A de clasificación de carcinogenicidad de U.S. EPA.

Tabla 19. Análisis comparativo del desempeño ambiental de productos preservantes

Clasificación de Preservante	Preservante de Madera	Rango de Lixiviación (%)	Notas	Salud humana	Dispersión ambiental	Ecotoxicidad acuática	Ecotoxicidad terrestre
SISTEMAS OLEOSOS DE 1ª GENERACIÓN	Creosota	<1-5	Lixiviación de HAP, varía según la exposición ambiental	29 B1 I II	25 2 25 12	29 S/D 24 S/D	4 10 6 16
	PCP (Pentaclorofenol)	5-20	Alta lixiviación en condiciones ácidas o húmedas	3 B2 II II	6 7 2 20	15 8 20 14	4 10 6 16
SISTEMAS OLEOSOS DE 1ª GENERACIÓN VIGENTES	CuN (Naftenato de Cobre)	2-15	El cobre lixivía más que el naftenato	11 D III II	23 11 1 1	17 16 18 12	28 24 19 15
SISTEMAS ACUOSOS A BASE DE COBRE	ACQ (Cobre Alcalino Cuaternario)	5-15	Los compuestos de amonio cuaternario lixivian más que el cobre	22 D II III	2 20 20 7	20 21 12 8	10 5 15 13
	CA (Azol de Cobre)	5-15	El cobre y los compuestos de azol lixivian a tasas similares	7 D II III	21 26 16 6	19 19 11 7	19 11 17 14
SISTEMAS ACUOSOS A BASE DE COBRE MICRONIZADO	MCA (Azol de Cobre Micronizado)	2-8	Las partículas micronizadas reducen la lixiviación en comparación con las	8 C II III	19 24 14 5	9 14 8 17	25 17 18 20
	MOQ (Cobre Cuaternario Micronizado)	2-8	Similar al MCA con menor lixiviación de cobre	23 D I II	3 21 21 8	10 15 9 22	11 6 16 S/D
SISTEMAS ACUOSOS A BASE DE COBRE	CX-A (Cobre-HDO)	5-20	Mayor lixiviación del HDO que del cobre	12 D II III	24 12 26 24	14 24 23 13	16 S/D 9 S/D
	Cu-8 (Cobre-8-Quinolinolato)	2-10	El cobre lixivía más fácilmente que el quinolinolato	31 D II III	27 30 4 2	6 12 15 11	27 14 S/D 7
SISTEMAS CON SOLVENTES A BASE DE TRIBUTIL ESTAÑO	TBTO (Óxido de Tributilestaño)	10-30	Alta lixiviación debido a la solubilidad	1 D II II	28 23 13 4	2 1 1 1	3 S/D 1 8
SISTEMAS ACUOSOS A BASE DE BORO	Boratos (Sales Sódicas y Ácido Bórico)	20-60	Muy alta lixiviación en condiciones húmedas	20 E IV IV	4 18 5 3	31 25 32 24	29 12 12 17
SISTEMAS ACUOSOS A BASE DE AMONIO CUATERNARIO (QUATS)	DDAC (Cloruro de Didecildimetilamonio)	10-30	Lixiviación significativa de compuestos de amonio cuaternario	24 E I II	10 10 30 22	23 28 13 25	12 7 21 S/D
	ADBAC (Cloruro de Alquil Dimetil Bencil Amonio)	10-30	Alta solubilidad en agua incrementa la lixiviación	30 E I II	7 4 31 23	18 18 7 S/D	13 8 25 S/D

Clasificación de Preservante	Preservante de Madera	Rango de Lixiviación (%)	Notas	Salud humana		Dispersión ambiental		Ecotoxicidad acuática		Ecotoxicidad terrestre	
SISTEMAS A BASE DE CARBONO - AZOLES	Tebuconazol	5-20	Lixiviación moderada de azoles	9 III	C III	20 15	25 11	28 26	20 18	26 23	19 21
	Propiconazol	5-20	Lixiviación similar al tebuconazol	21 II	C III	15 17	15 20	26 29	11 20	21 20	26 18
	Triadimefon	10-30	Mayor lixiviación que otros azoles	13 II	C III	17 7	16 22	27 28	22 15	15 7	20 11
SISTEMAS A BASE DE CARBONO - ISOTIAZOLINONAS	DCOIT (4,5-Dicloro-2-octil-isotiazolin-3-ona)	2-10	Lixiviación moderada, influenciada por el pH	28 I	D II	9 18	9 27	4 5	3 21	20 10	22 10
	OIT (2-Octil-isotiazolin-3-ona)	5-20	Mayor lixiviación que el DCOIT debido a su solubilidad	27 II	D II	13 12	5 29	11 16	5 S/D	22 S/D	9 S/D
	MIT/CMIT (Metil/Clorometil-isotiazolinona)	10-30	Muy alta lixiviación debido a su alta solubilidad	26 I	D I	18 8	3 26	12 17	23 19	23 8	4 9
SISTEMAS A BASE DE CARBONO - TIABENDAZOLES	Tiabendazol	5-20	Tasas de lixiviación moderadas	16 III	C III	22 23	27 10	21 22	17 16	31 14	25 12
SISTEMAS A BASE DE CARBONO - BENZOTIAZOLES	TCMTB (2-(Tiocianometil)benzotiazol)	10-30	Mayor lixiviación debido a la solubilidad del tiocianato	5 I	C I	16 24	28 30	5 6	7 S/D	9 S/D	16 S/D
	2-MBT (2-Mercaptobenzotiazol)	10-30	Alta lixiviación en ambientes húmedos	14 II	C II	30 19	22 16	24 27	S/D	5 S/D	23 S/D
SISTEMAS A BASE DE CARBONO - CARBAMATOS	IPBC	5-20	Lixiviación moderada; influenciada por la solubilidad en agua y las condiciones de exposición	32 I	E II	14 6	6 31	16 21	26 S/D	1 S/D	27 S/D
SISTEMAS A BASE DE CARBONO - NITRILOS	Clorotalonil	5-15	Baja solubilidad reduce la lixiviación	2 I	B2 II	26 22	13 28	8 10	13 10	30 11	21 19
SISTEMAS A BASE DE CARBONO - NEONICOTINOIDES	Imidacloprid	2-10	Baja lixiviación en comparación con otros pesticidas	19 III	E III	12 11	31 14	30 30	30 5	8 5	3 6
	Tiametoxam	10-20	Mayor lixiviación que el imidacloprid	18 III	C III	5 3	29 17	32 31	29 9	24 22	13 2
SISTEMAS A BASE DE CARBONO - PIRETROIDES	Bifentrina	<1-5	Muy baja lixiviación debido a su baja solubilidad	4 III	C IV	31 29	17 19	1 2	4 2	2 2	18 1
	Permetrina	<1-5	Similar a la bifentrina, baja lixiviación	15 III	C IV	29 27	19 25	7 3	6 6	17 24	28 3
SISTEMAS COMBINADOS Y OTROS	Betaína Polimérica	10-30	Alta solubilidad en agua incrementa la lixiviación	6 III	D IV	1 28	1 18	22 19	9 S/D	14 13	15 22
	PTI (Propiconazol-Tebuconazol-Imidacloprid)	5-15	Lixiviación combinada de azoles e imidacloprid	10 II	C III	11 10	14 12	25 25	10 4	7 4	2 5
	EL2	5-15	La lixiviación depende de la exposición ambiental	17 I	D II	8 9	8 15	3 4	2 3	6 3	1 4
	PXTS (Polixilenol Tetrasulfuro)	2-10	Datos limitados, se espera lixiviación moderada	25 III	D III	S/D S/D	S/D S/D	13 14	S/D 23	S/D S/D	S/D S/D

Es importante tener en cuenta que los parámetros de la tabla son indicadores de la peligrosidad de las sustancias y de su potencial de generar exposición a humanos y biota, no del riesgo real de exposición. Esto último es lo que en definitiva utiliza U.S. EPA y la EU para evaluar la aprobación de uso de un preservante de madera, en general a partir de escenarios estándar definidos por la OCDE, que procuran estimar el riesgo en condiciones conservadoras. Los resultados de U.S. EPA y/o EU de emplear esta metodología, que requiere el uso de modelos de dispersión en el ambiente o mediciones reales de concentración, se resumen para cada preservante en el capítulo 8.

El enfoque de la evaluación de riesgo a la salud y al ambiente, aun cuando en algunos casos contempla todas las fases del ciclo de vida del preservante de madera (p.ej. exposición ocupacional, a la población general y al ambiente en la fabricación del principio activo y formulación, en la aplicación del preservante, durante el servicio de la madera tratada y en su disposición final o reciclaje), está centrado en los impactos toxicológicos y ecotoxicológicos. Un enfoque ambiental más amplio debería cubrir otros impactos (recursos naturales, agua, emisiones GEI, etc.), como con la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (LCA) y, si se integra con las dimensiones social y económica de la sostenibilidad, con Análisis de Ciclo de Vida de la Sostenibilidad (SLCA).

A pesar de las consideraciones anteriores, no hay una herramienta perfecta para este tipo de evaluaciones. El LCA es muy intensivo en datos, pero aun así en su metodología estándar no llega a tener la especificidad del análisis de riesgo. Para comparación de sistemas de preservación de madera, por un lado el LCA debe definir con precisión el uso en la denominada unidad funcional (por ejemplo, preservar por 50 años la madera de un poste de servicio público en determinadas condiciones climáticas o la de un revestimiento interior), en tanto el análisis de riesgo debe definir con precisión el escenario (por ejemplo, exposición dérmica de niño jugando en estructura exterior de madera tratada, o el de un operario cargando preservante para tratamiento industrial a presión). Una tabla comparativa con estos enfoques, si bien no es imposible, tendría complejidades adicionales que podrían dificultar su interpretación.

La tabla procura compilar datos de 17 propiedades (no todos están disponibles) de cada uno de los 32 tipos de formulaciones de preservantes de madera evaluados, a partir de las fuentes ya mencionadas para el capítulo 8. Las propiedades se agrupan de la siguiente manera:

- **Rango de lixiviación (% p/p):** es el porcentaje en peso del preservante aplicado que lixivia fuera de la madera tratada ubicada en ambientes exteriores terrestres o acuáticos. Es la primera etapa previa a la dispersión en el ambiente, por lo que tiene una importancia crítica en el potencial impacto ambiental. Se expresa en un rango dado que para determinado preservante depende de varios factores (tipo de madera tratada, proceso de aplicación, condiciones ambientales, etc.) y varía con el tiempo desde la aplicación, por lo que los rangos son orientativos.
- **Salud humana:** dentro de esta categoría de impacto se incluyen indicadores para la **toxicidad crónica**, basado en el Nivel de Exposición Aceptable para Operarios (AOEL, en mg/kg_{p.c.}/d) y las clasificaciones de U.S. EPA de **carcinogenicidad**, de **irritante ocular** y de **irritante dérmico**.
- **Dispersión ambiental:** la facilidad con la cual una sustancia se dispersa en el ambiente por **solubilidad**, **volatilidad** (medido por la presión de vapor P_v) y **movilidad en suelo** (medido por el coeficiente de adsorción en suelo, K_{oc} o K_d), sumado a la **dificultad para degradarse** (medido por el tiempo medio de degradación, DT_{50}), son la base para indicadores de la potencial exposición de humanos y biota a la sustancia.
- **Ecotoxicidad acuática:** los parámetros seleccionados para base de los indicadores fueron la **toxicidad aguda** para **peces** y **crustáceos planctónicos** o *Daphnias* (medidas ambos por la concentración letal para 50% de la población, el LC_{50}), la **toxicidad crónica** para larvas de insecto en sedimentos (medida por la concentración con la concentración a la que no se observan efectos, **NOEC**) y la facilidad para acumularse en la cadena trófica (medido por el factor de bioconcentración, **BCF**).

- **Ecotoxicidad terrestre:** los parámetros seleccionados para base de los indicadores fueron la **toxicidad aguda** para **mamíferos** y **aves** (medidas ambos por la dosis letal para 50% de la población, el **LD₅₀**), la **toxicidad aguda** para **lombrices** (medida por la concentración letal en suelo para el 50% de la población, **LC₅₀**) y la **toxicidad aguda** por contacto para **abejas** (medida por la dosis letal para 50% de la población, el **LD₅₀**).

A excepción del rango de lixiviación, dato que aparece directamente en la tabla junto con una nota, el resto de los indicadores se representan gráficamente de la siguiente forma:

Salud humana		Dispersión ambiental		Ecotoxicidad acuática		Ecotoxicidad terrestre	
AOEL	Cáncer	Sol	P _v	LC ₅₀ pez	BCF	LD ₅₀ mam	LD ₅₀ ave
Irritante ocular	Irritante dérmico	K _{oc}	DT ₅₀	LC ₅₀ daph	NOEC sed	LC ₅₀ lomb	LD ₅₀ abeja

En las tres celdas en “Salud humana” que corresponden a cáncer, irritante ocular e irritante dérmico, se indica la categoría U.S. EPA para la sustancia. Para el resto de las celdas, el valor numérico que contienen no es el parámetro en sí, sino el número ordinal que le corresponde al preservante en la tabla, si se ordenara según la magnitud del parámetro, desde el valor menos favorable al más favorable. Por ejemplo, el número 1 en la celda DT₅₀ en “Dispersión ambiental” indica que es el preservante que requiere más días para degradarse, o directamente no es degradable, como el cobre. Por otro lado, el número 1 en la celda LC₅₀ pez indica que el preservante tiene toxicidad a concentración más baja que el resto. En todos los casos, las celdas tienen asignada una escala de colores que responde a las categorías por rango de valores que emplean organismos internacionales. Para toxicidad humana, si bien no hay una escala implementada universalmente, se adopta la siguiente escala, según el rango del AOEL en mg·kg⁻¹·p.c.·d⁻¹: > 0,1 baja; 0,1-0,01 moderada; < 0,01 alta. En las siguientes tablas se muestran las definiciones y colores básicos de las escalas.

Categoría	Descripción
Grupo A: Carcinógeno Humano	Hay evidencia suficiente para demostrar que la sustancia causa cáncer en humanos.
Grupo B1: Probable Carcinógeno Humano (evidencia limitada)	Existe evidencia limitada de carcinogenicidad en humanos, pero suficiente en estudios con animales.
Grupo B2: Probable Carcinógeno Humano (evidencia suficiente en animales)	No hay evidencia adecuada en humanos, pero hay suficiente evidencia en estudios con animales.
Grupo C: Posible Carcinógeno Humano	Existe evidencia limitada de carcinogenicidad en estudios con animales y ninguna o inadecuada en humanos.
Grupo D: No Clasificable respecto a Carcinogenicidad Humana	La evidencia disponible es insuficiente o inadecuada para evaluar el potencial carcinogénico en humanos o animales.
Grupo E: Evidencia de No Carcinogenicidad Humana	Hay suficiente evidencia para sugerir que la sustancia no es carcinogénica en humanos, basada en estudios bien diseñados en animales o humanos.

Categoría EPA	Irritación Ocular	Irritación Dérmica
Categoría I	Grave daño ocular irreversible: Incluye opacidad de córnea, lesiones graves en conjuntiva o iris que no se revierten en 21 días.	Grave daño dérmico: Quemaduras o corrosión, incluyendo necrosis de la piel que no se revierte en 14 días.
Categoría II	Irritación ocular severa: Lesiones graves (opacidad, daño al iris o conjuntiva) que se revierten parcialmente o totalmente en 7-21 días.	Irritación dérmica moderada: Eritema (enrojecimiento) o edema (hinchazón) severos que se revierten entre 72 horas y 14 días.
Categoría III	Irritación ocular leve: Lesiones leves o moderadas que se revierten completamente en 7 días o menos.	Irritación dérmica leve: Eritema o edema leves que se revierten completamente en menos de 72 horas.
Categoría IV	Sin irritación ocular apreciable: No se observan lesiones significativas en córnea, iris o conjuntiva.	Sin irritación dérmica apreciable: No se observan eritema o edema después de la exposición.

Propiedad	Métrica	Baja	Moderada	Alta
Movilidad en suelo	K_{oc} o K_d (L/kg)	≥ 500	50 – 500	< 50
Volatilidad	P_{vapor} (mPa)	$< 0,001$	0,001 – 10	≥ 1.000
Persistencia	DT_{50} (días)	< 30	30 – 180	≥ 365
Bioconcentración	BCF (L/kg)	10 – 500	500 – 1.000	≥ 1.000

Categoría	Acuática (LC ₅₀ o NOEC, mg/L)	Mamíferos y Aves (LD ₅₀ , mg/kg)	Lombrices (LC ₅₀ , mg/kg suelo)	Abejas (LD ₅₀ , µg/abeja)
Muy altamente tóxico	≤ 0.1	≤ 10	≤ 10	≤ 2
Altamente tóxico	> 0.1 – 1.0	> 10 – 50	> 10 – 100	> 2 – 10
Moderadamente tóxico	> 1.0 – 10	> 50 – 500	> 100 – 1,000	> 10 – 100
Ligeramente tóxico	> 10 – 100	> 500 – 2,000	> 1,000 – 5,000	> 100
Prácticamente no tóxico	> 100	> 2,000	> 5,000	No definido

A las limitaciones referidas antes por el empleo de parámetros indicadores de peligrosidad y exposición sin una evaluación de riesgo de escenarios específicos, deben advertirse también algunas simplificaciones al definir los valores de dichos parámetros. En primer lugar, no siempre están disponibles todos los parámetros (p.ej. hay poca información sobre el PXTS), aunque en algunos casos es posible estimar valores aproximados. Para formulaciones con más de un principio activo, a menos de que se hayan realizado ensayos específicos, la toxicidad se estima en base a la del principio activo más tóxico, pero en realidad pueden existir efectos sinérgicos o moderadores. Otros parámetros se definen en rangos que dependen de condiciones ambientales (p.ej. el K_{oc} depende del tipo de suelo, la toxicidad acuática del cobre depende del pH, etc.), por lo que se toma un valor medio.

Por último, todos los preservantes a base de cobre y estaño tienen la característica de persistencia en suelo determinada por ese componente no biodegradable, por lo que desde ese punto de vista son equivalentes y están en los primeros lugares de la tabla. Para ordenarlos entre sí se consideró la persistencia de la parte orgánica que va con el cobre (azol, HDO, oxina, etc.), que tienen distinta biodegradabilidad. Los boratos, si bien comparten la característica de no biodegradables con el cobre y el estaño, se los consideró en un nivel inferior por simplemente por ser más frecuente la presencia natural del boro en suelos.

8.1.2 Análisis de fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas de los preservantes

En base a lo arriba expuestos se presenta un análisis de fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas para los preservantes de la madera

8.1.2.1 SISTEMAS OLEOSOS DE PRIMERA GENERACIÓN: CREOSOTA Y PENTACLOROFENOL

Fortalezas:

- Alta eficacia en la protección contra hongos e insectos

- Propiedades hidrofóbicas que repelen agua previenen descomposición y congelamiento
- Alta permanencia
- Amplia disponibilidad en el mercado.
- Sistemas maduros muy conocidos con desempeños demostrados en campo de 70 a 80 años, especialmente el PCP
- Baja corrosión de metales en contacto con preservantes oleosos.
- Postes tratados con preservantes oleosos resisten mejor incendios

Debilidades:

- Percepción negativa debido a su toxicidad y riesgo ambiental.
- Regulaciones restrictivas en algunos mercados.
- Riesgo ecotoxicológico alto para organismos acuáticos. Contiene PAHs, algunos persistentes y bioacumulativos.
- Riesgos significativos a la salud de trabajadores en proceso de impregnación
- Aplicaciones limitadas solo a usos no residenciales.
- Genera residuos peligrosos que requieren manejo especializado.
- requieren temperatura para impregnación
- Los preservantes con base en aceite pueden dejar las superficies de madera tratada con texturas pegajosas
- El aceite empleado como solvente de soporte durante el tratamiento a presión le confiere a la madera tratada un olor que puede generar molestias
- En contacto con agua o suelos muy húmedos lixivian más que el CCA.
- La creosota no protege al menos frente a una especie marina de organismo perforante denominado *Limnoria tripunctata*.

Oportunidades:

- Creciente demanda de preservantes efectivos y con alta permanencia en aplicaciones exteriores.
- Con respecto a la efectividad para el control de agentes biológicos, cuando son prevalentes los hongos tolerantes al cobre, los tratamientos con creosota o PCP son preferidos

Amenazas:

- Competencia de alternativas más ecológicas.
- Cambios en la regulación tendientes a eliminar el uso del PCP, igual tendencia puede haber con creosota.

8.1.2.2 SISTEMAS OLEOSOS DE PRIMERA GENERACIÓN: NAFTENATO DE COBRE

Fortalezas:

- Altamente eficaz en la protección de la madera en ambientes húmedos, Eficacia comparable a la de otros preservantes a base de aceite

-
- Menos tóxico en comparación con otros preservantes oleosos.
- Características de manejo más limpias
- Mismas propiedades lubricantes que otros preservantes a base de aceite
- En su nueva forma hidrosoluble ha demostrado mejor desempeño, igualando al PCP
- La forma hidrosoluble ha superado dificultades de lixiviación
- No conductor/no corrosivo
- Permite el reciclaje y la recuperación de energía
- Compatible con el pretratamiento de borato Cellutreat
- Buena relación costo/efectividad.
- No restringido por EPA

Debilidades:

- Poca aceptación debido a la falta de conocimiento sobre sus beneficios.
- es un subproducto de la refinación del petróleo
- Toxicidad alta para especies acuáticas debido a la liberación de cobre iónico.
- Uso menos difundido y demanda de mercado baja.
- En su forma oleosa requiere temperatura para su aplicación. Costos de aplicación pueden ser elevados.
- En su forma oleosa pueden dejar las superficies de madera tratada con texturas pegajosas
- El aceite empleado como solvente durante el tratamiento a presión de la forma oleosa le confiere a la madera tratada un olor que puede generar molestias
- En contacto con agua o suelos muy húmedos la forma oleosa lixivia más que el CCA.

Oportunidades:

- Crecimiento en la demanda de productos menos dañinos para el medio ambiente.
- Están ocurriendo innovaciones en formulaciones que mejoran su desempeño.
- Necesidad del mercado de productos eficaces y con alta permanencia para usos exigidos, oportunidad para clase de uso 4.
- No está listado por la EPA como preservante de uso restricto
- En los EE. UU. puede ser adquirido en pequeñas cantidades para aplicaciones domésticas, lo que permite proteger superficies reprocesadas (cortes y perforaciones).

Amenazas:

- Podrían surgir regulaciones que restrinjan su uso.
- Competencia de productos más populares.

8.1.2.3 SISTEMAS ACUOSOS A BASE DE COBRE CONTENIENDO ARSÉNICO (CCA, ACA, ACZA)

Fortalezas:

- Alta eficacia en la protección de la madera.
- Producto muy estudiado, importante experiencia de industriales en el manejo de este producto.
- Larga vida útil en aplicaciones exteriores.
- Compatible con acabados en base acuosa y aceite.
- Bajo costo del CCA

Oportunidades:

- El CCA aún sigue siendo elegido por su desempeño comprobado para aplicaciones no residenciales.
- CCA-C, ACZA continúan siendo los preservantes elegidos para tratar pilares de madera en ambientes marinos en muchos lados

Debilidades:

- Alta toxicidad y riesgos ambientales asociados al arsénico.
- Riesgos significativos a la salud de trabajadores en proceso de impregnación y riesgo significativo para trabajadores en manipulación de polvo post-aplicación.
- Genera residuos peligrosos y dificultades para la disposición final.
- En algunos lugares está restringida su utilización y en otros prohibida.

Amenazas:

- Regulaciones cada vez más restrictivas que pueden prohibir su uso.
- Creciente competencia de preservantes sin arsénico.
- Percepción negativa del mercado.

8.1.2.4 SISTEMAS ACUOSOS A BASE DE COBRE (CA, ACQ)

Fortalezas:

- Eficacia en la protección contra hongos e insectos. Adecuados para clases de uso 1 a 3
- Eliminación de arsénico y cromo reduce riesgos para la salud
- Menor toxicidad para el ambiente y menor riesgo para salud en comparación con productos que contienen arsénico o cromo.
- Productos conocidos y aceptados por el mercado
- Productos fácilmente disponibles en Uruguay

Debilidades:

- Los azoles por sí solos no son eficaces contra mohos, hongos de pudrición blanda e insectos. Restricciones que pueden subsanarse con incorporación de co-biocidas y aumentando retenciones.
- Pueden tener problemas de deslavado y ser degradados por bacterias
- ACQ puede presentar problemas de pudrición marrón, mientras que los azoles no resisten pudrición blanda y mohos
- El cobre tiene alta toxicidad frente a organismos acuáticos; tebuconazol también pueden tener efecto perjudicial en organismos acuáticos.

- El propiconazol es posible disruptor endócrino.
- Requisitos de adecuación de instalaciones para impregnar con CCA debido al alto pH de solución de tratamiento.
- Costos de producción levemente más altos en comparación con preservantes tradicionales.

Oportunidades:

- Aumento en la demanda de productos sustitutos de CCA.
- Innovaciones en formulaciones que mejoren la efectividad.
- Mercado abierto para su uso residencial.

Amenazas:

- Cambio en las regulaciones que pudiera afectar el uso. Presiones en Europa a preservantes a base de cobre y azoles.
- Competencia de otros productos libres de cobre

8.1.2.5 SISTEMAS ACUOSOS A BASE DE COBRE MICRONIZADO (MCA Y MCQ)

Fortalezas:

- Alta eficacia con menores dosis que sus análogos solubles.
- Mayor resistencia a la lixiviación que sus análogos solubles
- Menor corrosión del acero inoxidable y de los sujetadores galvanizados por inmersión en caliente que sus análogos solubles
- Liberación controlada del cobre reduce impacto ambiental
- Menores costos de producción que sus análogos solubles
- Principio activo disponible en Uruguay.
- Costos levemente superiores al CCA

Debilidades:

- No muy buen desempeño frente a insectos del MCA, mejor el MCA-C. Agregado de co-biocidas puede mejorar aún más el desempeño.
- Se requiere más controles de proceso que en productos solubles
- Necesidad de más estudios para evaluar riesgos de nanopartículas de cobre.
- El cobre tiene alta toxicidad frente a organismos acuáticos; tebuconazol también pueden tener efecto perjudicial en organismos acuáticos.
- El propiconazol es posible disruptor endócrino.
- Costos de implementación más altos.

Oportunidades:

- Creciente interés en soluciones eficaces y menos tóxicas.
- Innovación continua que puede mejorar la formulación.
- Mercado abierto para su uso residencial.

Amenazas:

- Cambio en las regulaciones que pudiera afectar el uso. Presiones en Europa a preservantes a base de cobre y azoles.
- Competencia de otros productos libres de cobre

8.1.2.6 SISTEMAS ACUOSOS A BASE DE COBRE (CU HDO Y CX-8)

Fortalezas:

- Altamente efectivo contra hongos descomponedores, agentes de pudrición blanda e insectos.
- Eficientes en la protección de madera en entornos desafiantes, hasta condiciones de CU 4.
- Menor toxicidad en comparación con sistemas que contienen arsénico.
- No presenta riesgos significativos para los operadores en proceso en condiciones controladas con uso de equipos de protección personal así como para la población general

Debilidades:

- La madera tratada con Cu-HDO no es adecuada para uso en entornos acuáticos, ni para uso en colmenas.
- Cu-HDO no es un irritante de la piel ni un sensibilizador de la piel, pero es corrosivo para los tejidos oculares.
- Alto precio del preservante

Oportunidades:

- Demanda creciente por soluciones efectivas y seguras.

Amenazas:

- Regulaciones que podrían restringir su uso.
- Competencia de alternativas más amigables con el medio ambiente.

8.1.2.7 SISTEMAS ACUOSOS A BASE DE COBRE (CU-8)

Fortalezas:

- Eficaz en la protección contra insectos y hongos con amplio espectro de actividad.
- Requiere retenciones de cobre significativamente menores que otros productos
- Menor impacto ambiental que sistemas que contienen arsénico.
- Baja exposición para trabajadores y población general y baja toxicidad aguda para organismos terrestres.
- Excelente estabilidad y resistencia a la lixiviación
- Adecuado para controlar mohos y hongos de mancha
- Apropiado para tratamiento de tableros y para aplicaciones donde la madera puede entrar en contacto con alimentos
- Se comercializa también para uso doméstico

Debilidades:

- Riesgos para peces y plantas no vasculares en escenarios acuáticos específicos.
- La formulación acuosa tiene problemas de corrosión para los metales.
- No es promocionado en el mercado nacional

Oportunidades:

- Mercado para industria de la construcción aplicado en diferente tipo de productos
- Aumento de la demanda de preservantes con menor toxicidad.
- Oportunidad para tableros contrachapados

8.1.2.8 SISTEMAS ACUOSOS A BASE DE BORO

Fortalezas:

- Presenta buena eficacia de amplio espectro contra hongos e insectos xilófagos
- Muy buena difusión en la madera
- No son corrosivos para los sujetadores de metal.
- Son incoloros, la madera tratada se puede teñir o pintar una vez seca
- Brindan protección adicional frente al fuego
- Toxicidad extremadamente baja para los mamíferos y buen perfil ambiental.
- Es adecuado para madera y madera contrachapada, tableros de virutas orientadas (OSB), revestimientos, madera industrializada, compuestos de madera y plástico, carpintería, ventanas, puertas, muebles .
- Adecuado para tratamientos superficiales para usos interiores
- Tiene gran potencial para la protección de los productos de madera masiva (*mass timber*).

Debilidades

- Los boratos se lixivian fácilmente.
- Tienen la característica de persistencia en suelo por no ser biodegradable, aunque no es tan relevante por ser un elemento con presencia natural en el suelo.
- No son adecuados para condiciones expuestas al agua.

Oportunidades

- Tienen un mercado importante en la construcción con madera, para los elementos en CU 1 y CU 2.
- Desarrollos tecnológicos podrían mejorar su permanencia en la madera.

Amenazas

- Posibles medidas europeas tendientes a restringir el uso del boro
- Variaciones abruptas de precio debido a incremento de la demanda

8.1.2.9 DPAB. SISTEMAS ACUOSOS A BASE DE BETAÍNA POLIMÉRICA

Fortalezas:

- Alta eficacia como preservante de madera frente a insectos, hongos descomponedores (incluyendo hongos tolerantes al cobre) y hongos manchadores
- Muy buena penetración y distribución del preservantes, sustancialmente mejor que el DDAC.
- Protección sinérgica de sus componentes con el cobre.
- Excelente fijación del producto en la madera.
- Mayor resistencia mecánica en OSB tratado con DPAB.
- Menor delaminación en glulam tratado con KDS.
- Se dispone de formulaciones para aplicación por vacío presión y para aplicación por inmersión

Debilidades:

- Dependencia del pH para su penetración. Debe controlarse muy bien el proceso

Oportunidades:

- Creciente demanda de preservantes de madera ecológicos y sin cromo.
- Mercado en crecimiento para la construcción con madera, especialmente en construcción sostenible.

Amenazas

- Competencia de otros preservantes de madera más establecidos en el mercado.
- Regulaciones ambientales que pueden restringir el uso de ciertos compuestos.

8.1.2.10 OXIDO DE TRIBUTILESTAÑO (TBTO)

Fortalezas:

- Buena actividad biocida contra hongos e insectos.
- Protección efectiva frente a organismos marinos.
- Fácil formulación con hidrocarburos.
- Buena resistencia a la lixiviación.
- No colorea la madera ni reduce sus propiedades de resistencia.

Debilidades:

- Desalquilación lenta reduce la bioactividad. Más adecuado para áreas de bajo riesgo de deterioro.
- Riesgo no aceptable de exposición ocupacional incluso con EPP.
- Toxicidad extrema para organismos acuáticos, lo que plantea problemas ambientales significativos.
- Persistencia y bioacumulación en el medio ambiente, lo que puede llevar a riesgos a largo plazo.

Oportunidades:

- Uso en áreas frías del norte de Europa donde el riesgo es menor.
- Variante TBTN efectiva contra barrenadores marinos, ideal para madera expuesta al agua de mar.

Amenazas:

- Impacto negativo en la salud pública y en la biodiversidad, especialmente en mamíferos y aves.
- Necesidad de evaluaciones de riesgo más detalladas que podrían limitar su uso en el futuro.
- Posibles restricciones y prohibiciones en el uso del TBTO debido a su toxicidad.

8.1.2.11 SISTEMAS ORGÁNICOS: IPBC, CARBAMATO DE 3-YODO-2-PROPINILBUTILO

Ventajas:

- Es un biocida orgánico con baja toxicidad para los mamíferos.
- Buena eficacia contra hongos de descomposición y mohos.
- Su uso más común es como antimancha y en general en combinación con otros biocidas.
- Se diluye fácilmente en hidrocarburos
- El riesgo para salud ocupacional y la población general se considera aceptable

Desventajas

- No tiene actividad contra los insectos
- Aunque lentamente, se degrada en la madera.
- El riesgo de contaminación del suelo y de entornos acuáticos no se encuentra aceptable

Oportunidades:

- El IPBC se puede combinar con otros fungicidas y/o insecticidas para aplicaciones sobre el suelo en áreas de bajo riesgo (En Europa,)
-

8.1.2.12 SISTEMAS ORGÁNICOS: ISOTIAZOLINONAS (DCOIT, MIT (2-METHYL-4-ISOTHIAZOLINE-3-ONE) + CMIT (5-CHLORO-2-METHYL-4-ISOTHIAZOLINE-3-ONE), DCOIT+ IMIDACLOPRID)

Fortalezas

- Alta efectividad
- Baja toxicidad ambiental y para la población general
- No presenta riesgos para operarios.

Debilidades

- Puede provocar alergias, por lo que debe evitar el contacto directo
- mayor costo que CCA
- DCOI puede producir toxicidad aguda a seres acuáticos, sin embargo tendría menor impacto ambiental que los metales pesados

Oportunidades

- Posible sustituto al CCA en UC 4.
- DCOIT+ imidacloprid estandarizado para UC 1 a UC 3 , lo que puede significar un amplio mercado en la construcción con madera

8.1.2.13 SISTEMAS ORGÁNICOS: COMBINACIÓN DE AZOLES, QUATS, QUATS Y AZOLES, CON AGREGADO DE INSECTICIDA (PTI, CIPROCONAZOL + TIAMETOXAM)

Fortalezas

- Complementación de efectos y actividad sinérgica entre componentes mejora desempeño
- Aceptable impacto ambiental (aunque difiere entre los principios activos, ver arriba comparación ambiental)

Debilidades

- Los azoles solos no proveen actividad contra insectos, por lo que se deben utilizar combinados con otros productos
- Lixiviación es siempre un problema para estos productos
- Los azoles están comenzando a ser cuestionados desde el punto de vista ambiental en Europa

Oportunidades

- En Europa se tiende a utilizar productos sin metales
- Existe sostenida I+D buscando combinaciones de productos orgánicos.
- Una combinación adecuada de estos productos puede tener un gran mercado para la las UC1 a UC3 en la construcción

8.1.2.14 PXTS

Fortalezas

- Alta efectividad para UC3 y UC4, incluso UC5. Superando a creosota
- Bajo impacto en salud y ambiental

Debilidades

- Alta viscosidad, requiere temperatura
- Puede ser poco competitivo por precio

Oportunidades

- Sustitución al CCA y otros preservantes a base de cobre en entornos con preocupación de lixiviación

8.1.2.15 CLOROTALONIL

Fortalezas

- Tiene una amplia efectividad contra hongos de descomposición e insectos
- Es estable y resiste a la lixiviación
- Tiene una toxicidad extremadamente baja para los mamíferos

Debilidades

- Baja solubilidad dificulta formulación y penetración en la madera

Oportunidad

- Nuevas formulaciones pueden mejorar solubilidad

CONCLUSIÓN

En función del análisis FODA realizado, se encuentran varias oportunidades para el estudio de preservantes nuevos para Uruguay.

El producto más utilizado en Uruguay es el CCA, que paulatinamente está dejando de ser utilizado, especialmente para aplicaciones domésticas.

Es responsabilidad de los tomadores de decisiones el promover el avance tecnológico sostenibles. Por lo tanto, la protección ambiental y el cuidado de la salud y seguridad ocupacional son factores preponderantes para la elaboración de una estrategia nacional en este tema.

Sin embargo la selección de alternativas al CCA debe sostenerse sobre eficacia y eficiencia del preservante para cumplir con su objetivo. Ningún preservante es en sí mismo “perfecto” y ninguno cumple con todos los parámetros deseables. Por otra parte los preservantes deben ser estudiados en su efectividad sobre las maderas nacionales, contra los agentes nacionales y en las condiciones climáticas del lugar.

Para ello se realizó una priorización de nuevos preservantes a estudiar en condiciones locales:

Se considera importante buscar para el corto plazo alternativas ya estudiadas y estandarizadas en otros países, así como algunas alternativas emergentes: Sistemas de preservantes conteniendo cobre, conteniendo boro y sistemas orgánicos, teniendo en consideración la incorporación de aditivos a la formulación como ser hidrorrepelentes

SISTEMAS A BASE DE COBRE

- Sistemas micronizados como el MCA-C -Clases de uso 1 al 3

SISTEMAS A BASE DE BORO

- DOT, SBX – boratos, Betaína polimérica - Clases de uso 1 y 2

SISTEMAS ORGANICOS MODERNOS

- Combinación de productos orgánicos

A modo de ejemplo se listan algunas combinaciones

Clases de uso 1 al 3

- Azoles + Quats + insecticida; PTI, TEB, PPZ, imidacloprid. CIPROCONAZOL, TIAMETOXAM
- IPBC-SB-1, IPBC con hidrorrepelente. Triazoles combinados con insecticidas O fungicidas
- IPBC/PPZ/TEB-SB-1

Clase de uso 4

- ISOTIAZOLINONAS: DCOI, MIT/CMIT o EL2
- BETAINA POLIMERICA

Por otra parte, teniendo en cuenta el grado de avance de la introducción tecnológica y partir de las conclusiones extraídas del análisis FODA, se selecciona el MCA-C como un candidato para realizar un estudio preliminar de factibilidad tecno económica.

-

8.2 ANALISIS DE FORTALEZAS, DEBILIDADES, OPORTUNIDADES Y AMENAZAS DEL TRATAMIENTO TÉRMICO

Fortalezas

1) Mejora en sus propiedades

La madera termotratada tiene menor valores de contenido de humedad de equilibrio que la madera sin tratar para las mismas condiciones atmosféricas y tiene mayor estabilidad dimensional. En líneas generales, el tratamiento térmico mejora la resistencia al deterioro de la madera y por otra parte, tiene menor conductividad térmica que la sin tratar.

2) Producción nacional de madera térmicamente modificada

Existe una empresa uruguaya, Maderera Piedra del Toro, que desde 2021 produce tablas de madera térmicamente modificada, tanto en pino como eucalipto. Para ello, la empresa adquiere en plaza o importa tablas clear de alta calidad que son modificadas en su horno. En un proceso que requiere de mucho ensayo y error, por lo que es de relevancia que exista en el país una empresa pionera.

3) Barracas que comercializan madera térmicamente modificada

Existe disponibilidad en el mercado doméstico de madera térmicamente modificada a través de algunas barracas que comercializan productos importados, además de la posibilidad de adquirirla en la única empresa nacional que produce, algunas barracas comercializan estos productos importados. Esto se considera relevante para la difusión de un producto nuevo,

para que arquitectos, diseñadores y el público en general pueda conocer y disponer de esta alternativa tecnológica.

4) Conocimiento generado en grupos de investigación

Al menos en dos instituciones nacionales existe conocimiento y experiencia en el trabajo e investigación en madera térmicamente modificada. Tanto en el LATU, como en el Grupo de Ingeniería de Procesos Forestales de la Facultad de Ingeniería (UDELAR), se han realizado trabajos, proyectos e investigaciones en madera térmicamente modificada. Si bien la tecnología es conocida en el mundo, es relevante adaptarla a las maderas nacionales y optimizar los procesos en función del ambiente al que serán expuestos.

5) Bajo impacto ambiental de la producción de madera térmicamente modificada

La principal ventaja de la madera térmicamente modificada frente a otros tipos de preservación es el muy bajo impacto ambiental que tiene el proceso de producción. Al no utilizarse productos químicos, al ser la energía eléctrica renovable en Uruguay, y debido a que los energéticos utilizados en la industria maderera nacional son principalmente residuos y subproductos, el impacto ambiental es mínimo.

Adicionalmente, al momento de la disposición final, la madera térmicamente modificada es segura, no habiendo inconvenientes en la adopción de cualquier método (incineración o en vertedero, por ejemplo).

6) Seguridad en el uso

En la misma línea que el punto anterior, la madera térmicamente modificada es segura y apta para cualquier uso, pudiendo estar en contacto niños y animales. Esto representa una ventaja comparativa importante frente a otro tipo de preservantes.

Debilidades

1) Pérdidas de propiedades mecánicas de la madera

La principal limitante del proceso de modificación térmica es la pérdida en las propiedades mecánicas de la madera. En consecuencia, la madera térmicamente tratada suele no ser apta para usos estructurales. Esto limita las posibilidades en el uso de la madera térmicamente modificada a revestimientos, pisos, muebles, o cualquier otro uso que no requiera de soportar cargas significativas. En teoría, es posible reducir la intensidad del tratamiento térmico para evitar significativamente pérdidas de las propiedades mecánicas, pero el efecto preservante será menor.

2) Pérdidas por rajaduras y alabeos en *E. grandis*.

En los proyectos de investigación realizados en la Facultad de Ingeniería, se ha constatado que las tablas de *E. grandis* sufren en proporción más defectos que las tablas de coníferas. Este hecho fue corroborado por la empresa que produce madera modificada: se pierden 3 veces más tablas en *E. grandis* que en *P. taeda*.

Si bien es posible ajustar el proceso para obtener un equilibrio entre durabilidad y pérdidas por defectos, la susceptibilidad de la madera de *E. grandis* a defectos por la modificación térmica es una limitante a tener en consideración.

3) Elevado costo de producción para pequeña escala

El principal costo de producción son las tablas, en caso de adquirirlas previamente secadas, a lo que se agrega que deben ser de buena calidad y libre de nudos. En segundo lugar, lo sigue el costo de la energía empleada en el proceso, fundamentalmente si se emplea gas (GLP o gas natural). Esta opción energética se presenta como una opción versátil pero costosa, elegida para escalas pequeñas o medianas (como la que actualmente produce). Estos elevados costos hacen difícil competir en precio con alternativas como el CCA.

En el caso que se realice la producción en aserraderos instalados, que ya emplean biomasa como combustible, los costos serían menores debido al aprovechamiento de la escala y la mano de obra previamente empleada. Además, sería posible utilizar como combustible las pérdidas por defectos en el proceso y aquellas que ocurren durante el mecanizado de las tablas (aproximadamente un 10% en peso).

4) Dificultad de estandarización y certificación de productos y procesos

En Uruguay no existen en la actualidad esquemas de estandarización y certificación de productos de la madera. Esto dificultaría la homogenización y las garantías a los consumidores. A esto se le debe adicionar que, específicamente en madera modificada térmicamente, existen limitantes en cuanto a la certificación y estandarización. En efecto, su proceso de certificación no está totalmente armonizado en todo el mundo. Por ejemplo, la Asociación Internacional ThermoWood es una de las principales organizaciones que regula este tipo de productos, pero su reconocimiento es limitado a ciertas regiones, lo que genera discrepancias en la aplicación de estándares y certificaciones en otros mercados. Además, el hecho de que no existan normativas universales claras sobre su producción y uso genera cierta confusión entre fabricantes y usuarios. Esto puede frenar su adopción en algunas regiones donde no existen estándares claros de calidad o compatibilidad con normativas locales.

La empresa Maderera del Toro ha realizado ensayos enviando muestras a Alemania, para determinar la durabilidad de las tablas modificadas en función

de los estándares europeos. Conforme crezca la disponibilidad en el mercado doméstico de distintos productos de la madera, es necesario contar con esquemas básicos de estandarización que brinde garantías a los consumidores.

FACTORES EXTERNOS

Oportunidades

1) Existencia en plaza de madera de calidad de eucalipto y pino

Uruguay tiene una producción importante de madera aserrada: 250.000 y 320.000 m³/año de eucalipto y pino respectivamente (promedio 2014-2022)¹⁸. De esta forma, existe disponibilidad de madera nacional de calidad para producir madera térmicamente modificada. Debe considerarse que para el proceso se requiere de tablas de alta calidad, sin nudos (clear). Adicionalmente, las importaciones de tablas de *E. grandis* de la región es una posibilidad certera. Existe una diferencial de precios que favorece la importación tablas desde Argentina

1) Impulso nacional a la utilización de madera en edificación

Si bien Uruguay no es un país con tradición en construcción con madera, en la actualidad existe consenso entre los diversos actores de la necesidad de sumar esfuerzos para promover su uso. Desde hace un tiempo, el estado uruguayo se encuentra impulsando el uso de madera en edificación. Por ejemplo, en el Plan Quinquenal de Vivienda 2020-2024 del Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial (MVOT), se plantea como uno de los objetivos “promover el uso de la madera de origen nacional en soluciones constructivas tendientes a aumentar la oferta de vivienda pública, reduciendo los tiempos de ejecución y los costos de obra”. En el mismo sentido, desde el año 2020 funciona la Comisión Honoraria de la Madera, un ámbito colaborativo integrado por actores del sector privado, público, académico y profesional, con el objetivo de fomentar el uso del recurso forestal uruguayo¹⁹. Adicionalmente, dentro del MVOT, funciona desde el 2021 la Oficina de Asesoramiento, Planificación y Desarrollo de la Construcción en madera, con objetivos específicos en promoción y difusión. Los esfuerzos estatales mencionados redundan en una oportunidad para un aumento de la demanda de productos de la madera, así como la adopción de nuevas tecnologías, como lo son los distintos métodos de preservación.

2) Impulso del estado para la utilización de alternativas al CCA

¹⁸ Estadísticas MGAP - DGF

¹⁹ MVOT (2022). Hoja de Ruta para la Construcción de Vivienda Social

Existen algunas iniciativas, del estado uruguayo, que se enfocan concretamente en alternativas tecnológicas sostenibles ambientalmente. Por ejemplo, en julio de 2024 se realizó una licitación para la construcción de una infraestructura liviana en madera dentro del Parque de Esteros de Farrapos e Islas del Río Uruguay, en el departamento de Río Negro. El llamado, realizado por el Ministerio de Ambiente, solicita específicamente que la madera a utilizar no puede ser preservada mediante métodos como el CCA²⁰. Esto ejemplifica la oportunidad que se la presenta a la modificación térmica para ser un sustituto ambientalmente sostenible.

3) Sustitución de madera importada por producción nacional

La madera modificada térmicamente de producción nacional puede sustituir las maderas tradicionalmente utilizadas para exteriores, como son maderas tropicales importadas. Uruguay importa anualmente unos 10 millones de dólares en madera aserradas, de los cuales más de la mitad son de maderas tropicales, siendo el lapacho la principal. Este tipo de madera son de alta durabilidad, y pueden resistir durante años en condiciones externas. Para lograr concretar esta oportunidad, la madera modificada térmicamente debe competir tanto en precio como en calidad y durabilidad.

4) Exportación a la región

En los países de la región, Argentina y Brasil, no existe producción de madera térmicamente modificada relevante. Existen algunas incursiones en Brasil, pero dado el tamaño de dicho mercado aún no parece como un aspecto relevante. Dado lo acotado en dimensión del mercado uruguayo, es deseable que todos los productos forestales tengan también la mirada puesta en la exportación. Es posible estimar que el mercado europeo se encuentra suficientemente abastecido por productos de madera térmicamente modificada, por lo que quizás las mayores oportunidades de exportación para la producción local sea la región.

5) Investigación para optimizar tratamiento para minimizar pérdidas

Existe suficiente experiencia en distintos grupos de investigación y desarrollo en Uruguay, que han estudiado el comportamiento de distintos tipos de maderas sometidos a modificación térmica. En este sentido, sinergias entre actores privados interesados o que actualmente producen, y estos grupos de investigación, supone una oportunidad para optimizar los procesos y acelerar la curva de aprendizaje natural que tiene el desarrollo de estos nuevos productos y tecnologías.

Amenazas

²⁰ <https://cnd.org.uy/es/llamado-01-2024-ministerio-de-ambiente-rio-negro>

1) Dificultad de competir con CCA en precio

El principal competidor de la madera térmicamente modificada es la preservación mediante CCA. En Uruguay, este es el principal método empleado para preservar tablas que serán utilizadas en exteriores. En el estado incipiente actual de desarrollo de la producción nacional de MTM, los costos asociados producto de la curva de aprendizaje y de la escala, resultan en precios finales superiores a la oferta de tablas tratadas con CCA. Esto supone una barrera importante para el aumento de la demanda por productos térmicamente modificados.

2) Falta de normativa nacional que limite el uso de CCA

Los mercados de madera térmicamente modificada se han desarrollado en países en los que se ha prohibido o limitado el uso de CCA como método de preservación, el cual era muy utilizado hasta comienzos del siglo XXI. En la Unión Europea, desde 2004²¹, se prohíbe la utilización de madera preservada con CCA en edificios residenciales bajo el fundamento de que el arsénico puede ser inhalado por las personas cuando la madera se quema y, además, con el tiempo se produce un lixiviado de los compuestos químicos que pueden contaminar suelos y agua. La madera tratada con CCA se encuentra prohibida o muy limitada en países como Indonesia, Suiza, Suecia, Vietnam y Japón²². En Estados Unidos, los fabricantes han reducido su utilización de forma voluntaria desde 2003. A partir de 2004, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) limitó su uso para uso residencial y está actualmente revisando el proceso de registro del CCA²³. Australia y Nueva Zelanda si bien no prohíben el uso, lo regulan particularmente en usos industriales ²⁴ ²⁵. Además, la disposición final de la madera tratada, la cual contiene metales pesados, es compleja para evitar la liberación de dichos metales al ambiente. En Uruguay, hasta el momento, no existen normativas que limiten su utilización, lo que supone una barrera importante para la difusión de la MTM.

3) Limitado mercado doméstico

Tal como ha sido desarrollado en otras secciones, a pesar de distintas iniciativas que promueven el uso de la madera, el mercado nacional uruguayo es limitado por sus dimensiones. Su escala reducida es una barrera para el desarrollo de

²¹ Directiva 2003/4/EC del Parlamento Europeo

²² Mohajerani, A. et al. 2018 – Chromated copper arsenate timber: a review of products, leachate studies and recycling.

²³ <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/chromated-arsenicals-cca>

²⁴ <https://www.apvma.gov.au/chemicals-and-products/chemical-review/listing/arsenic-timber-treatments>

²⁵ <https://www.epa.govt.nz/assets/Uploads/Documents/Hazardous-Substances/Guidance/ERMA-CCA-q-and-a-prepared-in-2003.pdf>

producciones a escalas importantes, lo que limita la competitividad de los productos nacionales frente a alternativas ya existentes o madera importada.

4) Poco conocimiento del producto por los usuarios

En el contexto de lo limitado del uso de la madera en Uruguay, la tecnología de modificación térmica está poco difundida entre los potenciales usuarios. De momento son pocas las barracas que ofrecen el producto. Para lograr aumentar la demanda, es necesario realizar actividades de difusión.

Conclusión

En función del análisis FODA realizado, se considera como una oportunidad el desarrollo de la producción de madera térmicamente modificada en Uruguay. Las fortalezas y oportunidades relevadas son de importancia: un producto con propiedades mejoradas, disponibilidad de materia prima de calidad, experiencia previa en investigación y producción en Uruguay, incentivos estatales para la utilización de madera en edificación.

Sin embargo, se debe considerar que existen una serie de debilidades y amenazas que suponen barreras a la implementación y difusión de esta tecnología. La principal de ellas es la no existencia de limitantes a usos de preservantes que compiten con la MTM, como el CCA, en Uruguay. En segundo lugar, la MTM no es apta para usos estructurales lo que limita las posibilidades en su utilización.

A partir de las conclusiones extraídas del análisis FODA, se selecciona la modificación térmica de madera nacional para uso no estructural para la realización del análisis técnico-económico.

8.3 ANALISIS DE FORTALEZAS, DEBILIDADES, OPORTUNIDADES Y AMENAZAS DE LA MODIFICACIÓN QUÍMICA

FORTALEZAS

- 1) La madera químicamente modificada tiene en general mayor resistencia al biodeterioro, confiriéndole mayor vida en servicio
- 2) Los procesos de modificación química mejoran generalmente la estabilidad dimensional de la madera y disminuyen la conductividad eléctrica
- 3) La madera modificada químicamente es vista como una alternativa menos contaminante al tratamiento químico tradicional. El impulso al sector de construcción con madera pone de manifiesto la necesidad de tratamientos que incrementen la vida útil de las maderas nacionales que no sean peligrosos ni contaminantes. La madera modificada químicamente no contamina por efecto de la lixiviación no deseada de productos químicos en ambientes húmedos y puede realizarse su disposición final en rellenos sanitarios comunes.

Debilidades

1) La modificación química de madera requiere de una alta inversión inicial y tiene elevado costos operativos.

Los mencionados costos conducen a un producto final demasiado caro para el mercado uruguayo, que no es competitivo con la madera tratada de modo tradicional.

2) Poca investigación nacional de modificación química de especies que crecen en el país

La efectividad de los procesos de modificación química es altamente dependiente de las características de la especie madera que se trata, tanto anatómicas como químicas y físicas. Es limitado el número de especies que se han modificado químicamente a nivel de laboratorio y solo una parte de ellas, alcanzó la etapa industrial (Jones, Sandberg, 2020). En Uruguay se debe profundizar el conocimiento de las especies modificables que presenta el país.

3) La mayoría de los reactivos necesarios para los procesos de modificación química son importados.

De acuerdo a Sandberg y colaboradores (2021), el éxito de los procesos de modificación química de madera depende no solo de contar con el "know how", desarrollado a lo largo del tiempo, sino también con una industria química que pueda proveer de los reactivos necesarios. Nuestro país hoy no cuenta con tal suministro de reactivos nacionales, por lo cual deben ser importados lo que incrementa mucho los costos del proyecto. Un ejemplo de ello es Accys (Accoya), que ha instalado sus plantas productivas en EE. UU., en el mismo complejo industrial que se encuentra la empresa que les suministra los reactivos, Eastman Chemical Company.

4) La madera químicamente modificada es un producto casi desconocido en el mercado uruguayo

El conocimiento y la percepción del mercado respecto a la madera tratada, es un factor relevante a la hora de decidir entre varios productos. La madera ya sea acetilada o furfurilada son productos desconocidos en Uruguay lo que limita mucho su comercialización, considerando además que tendrían un mayor costo que la madera tratada, por ejemplo con CCA.

OPORTUNIDADES

1) Iniciativas gubernamentales que incentivan el desarrollo de una sociedad más sustentable.

Uruguay viene realizando esfuerzos para lograr la sostenibilidad y desarrollo sostenible del país, implementando políticas que promueven el uso de energías renovables, agricultura sostenible, conservación de su biodiversidad, y la promoción de prácticas responsables en la producción y el consumo. El poder contar con procesos que incrementen la vida útil de la madera, que proporcionen un producto final de baja toxicidad acompaña estos esfuerzos.

2) Interés de empresas que modifican madera de estar en América Latina

Accoya, empresa que acetila madera en Europa, trabaja con el *Pinus radiata* de Chile, que luego se los importa, y se encuentra estudiando la posibilidad de acetilar el *Pinus taeda* de Uruguay (comunicación personal, 2024).

3) Impulso al sector de construcción con madera que requiere de madera tratada de baja toxicidad

Como se mencionó anteriormente el Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial de Uruguay (MVOT) ha promovido el uso de la madera nacional en soluciones constructivas tendientes a aumentar la oferta de vivienda pública, reduciendo los tiempos de ejecución, los costos de obra y mejorando la calidad de vida de los usuarios. En este marco se pueden considerar opciones de madera químicamente modificada que puede utilizarse en interiores y en contacto con personas y animales.

4) Iniciativas del estado a limitar el uso de CCA por su peligrosidad

La madera químicamente modificada, no lixivia y su disposición final no requiere condiciones especiales de residuo peligroso.

5) Disponibilidad de madera adecuada:

Los procesos de modificación química solo procesan tablas de alta calidad por tratarse de procesos de altos costos. En Uruguay se produce madera de *Pinus taeda* y *Pinus elliotti* de calidad. Según el último Inventario Forestal del MGAP (2021), en Uruguay hay 150.908 hectáreas con pino. El 30% de la producción son tablas aserradas, dentro de las que se encuentran las tablas libres de defectos, madera sin nudos de alta calidad, adecuadas para estos procesos.

AMENAZAS

1) La madera químicamente modificada hoy no compete con precios de tablas tratadas en el mercado nacional.

Es un producto que por su precio quedaría limitado a determinados nichos de mercado y no sustituiría a la madera químicamente tratada

2) El mercado nacional es muy limitado

La inversión inicial y el desarrollo de la producción en las plantas de modificación química son muy costosos, su existencia solo es posible si se exporta a otros mercados.

Conclusión

En función del análisis FODA realizado se puede concluir que el desarrollo de los procesos industriales de modificación química de madera en el país presenta varias fortalezas y oportunidades, dadas fundamentalmente por la mejora en varias propiedades de la madera, la disponibilidad de madera de

calidad de las especies que serían factibles de modificación química y las iniciativas estatales referidas a la promoción de la construcción con madera en un marco de desarrollo sostenible.

Sin embargo las debilidades y amenazas que presente este tipo de desarrollo están vinculadas a aspectos económicos, ya que son tratamientos costosos, siendo el costo de los reactivos químicos necesarios el principal obstáculo y a la necesidad de generar conocimiento que vinculen estos tratamientos a las especies madereras nacionales. Por lo tanto se necesitaría de estrategias que fomenten inversiones como las requeridas para esta industria, y que la faciliten la exportación de la madera modificada, ya que el mercado interno es muy reducido y un producto de mayor precio, solo puede atraer a un nicho de mercado más pequeño aún

Por estas razones los procesos de modificación química no fueron seleccionados para la realización del análisis técnico-económico.

CONTEXTO

En un contexto de preocupación global por el cambio climático y el desarrollo sostenible, se promueve la utilización en forma sostenible de la madera y los productos derivados provenientes de plantaciones renovables como sustituto de otros materiales para la construcción.

El uso de preservantes de madera es fundamental para proteger contra los efectos nocivos del cambio climático y para ampliar los intervalos de mantenimiento de la madera.

Los crecientes riesgos de biodeterioro debido al cambio climático a los que se enfrenta el patrimonio de madera hacen necesario atender este factor al prolongar la vida útil de los productos de madera.

Las reglamentaciones se vuelven gradualmente más exigentes en lo concerniente al cuidado ambiental y de la salud.

Los preservantes históricos están siendo restringidos en su uso y comercialización

Las agencias reguladoras, en especial en Europa, presionan a los fabricantes de productos a que desarrollen productos con baja toxicidad en términos del medio ambiente y de la salud humana. Por otra parte, el mercado de consumo europeo contribuye con presiones en este mismo sentido. Es necesario examinar a largo plazo y de forma comparativa los efectos integrales del ciclo de vida de varios métodos de preservación de la madera.

DESAFIOS TECNOLOGICOS

El desafío más obvio es encontrar nuevos principios activos más amigables con el ambiente, que sean más rentables o competitivos que los que ya están en el mercado.

La búsqueda de sistemas de menor toxicidad para proteger la será esencial para mantener la viabilidad de la madera como material de construcción renovable en entornos adversos.

La protección debe realizarse en forma efectiva pero también eficiente, aportándole protección de acuerdo al uso para el cual la madera está destinada. No menor, pero tampoco mayor, ya que esto implica una carga adicional de químicos o energía con el consiguiente costo e impacto ambiental. En este contexto se busca más especificidad de la protección de la madera según el uso final.

El éxito de los productos comerciales radica en que se pueda producir de forma rentable un gran volumen de productos, y a precios muy competitivos. Este umbral para la industrialización puede ser demasiado alto para nuevos métodos potenciales.

DESARROLLOS

Nuevas moléculas surgidas del campo de agroquímicos, la combinación sinérgica de moléculas y el uso de aditivos han contribuido al avance de la industria.

Se han desarrollado preservantes que han logrado reemplazar para usos residenciales, a los preservantes de primera generación más peligrosos, como el CCA, el PCP o la creosota. Para usos más exigidos son más difíciles de sustituir.

MERCADO

El desarrollo de la construcción con madera maciza es un nuevo mercado para la preservación de madera con bajos niveles de penetración.

El crecimiento del mercado de los decks y las dificultades sanitarias que presentan los embalajes de madera se presentan como oportunidades de crecimiento del mercado de la madera preservada.

Por otro lado, algunos preservantes y nuevos métodos de preservación de la madera no son económicos y requieren mayor investigación y pruebas a largo plazo.

FUTURO

La madera termotratada se perfila con una buena alternativa para usos no estructurales.

La madera modificada químicamente es un producto “de nicho” con muy buenas propiedades pero de alto costo.

Siendo una opción sensiblemente más económica a los productos de madera modificada, la madera impregnada a presión seguirá desarrollándose y asegurando su mercado en el futuro.

Preservantes obtenidos a partir de productos naturales pueden ser oportunos para algunas clases de uso.

Se puede esperar aumento de las presiones regulatorias y de costos sobre los enfoques tradicionales de preservación de la madera por parte de los organismos a nivel europeo. Se genera un entorno propicio para el crecimiento de los métodos de preservación de la madera respetuosos con el medio ambiente y más capaces de combatir las consecuencias del cambio climático.

Algunos referentes opinan que el proceso de evaluación y certificación que acompaña el registro será más fácil a medida que aumente la participación de mercado de estos productos.

El fortalecimiento de esta tendencia generará muchas oportunidades para explorar las propiedades y aplicaciones de productos de madera innovadores y duraderos.

A nivel local

Es importante aumentar la concientización de la importancia de preservar la madera en forma adecuada.

Es necesario destinar esfuerzos a la normalización y regulación de la madera preservada en Uruguay.

El estado debería considerar el uso de tecnologías de protección de la madera que viabilicen el uso de este material para obras de ingeniería en forma sostenible.

Para el caso específico de Uruguay se recomienda el estudio de preservantes comercialmente disponibles aplicados a maderas nacionales y expuesto a condiciones locales.

Se verificó la viabilidad económica y financiera de la instalación en Uruguay de una planta impregnadora que utilice MCA como preservante, siempre que el mercado nacional absorba su producción (ANEXO 1)

Sin embargo, se entiende que mientras no existan limitantes legales al uso de CCA como preservante, la colocación del producto de forma masiva es poco probable, ya que la mayor parte de los consumidores no se verán atraídos a consumir un producto más costoso y menos conocido que el CCA.

El estudio debería incluir al menos la determinación de las mínimas retenciones adecuadas para las diferentes condiciones de uso, a través de ensayos de campo y de laboratorio. Si se estudian los preservantes en productos de ingeniería de madera también deben estudiarse efectos del preservante en las uniones.

Se considera interesante el estudio de:

SISTEMAS A BASE DE COBRE

- Sistemas micronizados como el MCA-C -Clases de uso 1 al 3

SISTEMAS A BASE DE BORO

- DOT, SBX – boratos, Betaína polimérica - Clases de uso 1 y 2

SISTEMAS ORGANICOS MODERNOS

Combinación de productos orgánicos

A modo de ejemplo se listan algunas combinaciones

Clases de uso 1 al 3

- Azoles + Quats + insecticida; PTI, TEB, PPZ, imidacloprid. CIPROCONAZOL, TIAMETOXAM
- IPBC-SB-1, IPBC con hidrorrepelente. Triazoles combinados con insecticidas O fungicidas
- IPBC/PPZ/TEB-SB-1

Clase de uso 4

- ISOTIAZOLINONAS: DCOI, MIT/CMIT o EL2

Por otra parte los nuevos sistemas de tratamiento ofrecen otras oportunidades. Nuevas plataformas de tecnología de formulación pueden mejorar la penetración y la deposición dentro de la madera. Se considera relevante explorar:

- Tratamiento True Core para la aplicación de preservantes sobre *Eucalyptus grandis*
- Pretratamientos que modifiquen la estructura de la madera de forma

Los productos de madera modificada parecen dignos de desarrollo y comercialización, especialmente con el creciente interés en los conceptos de reciclabilidad y ciclo de vida.

Aspectos económicos podrían limitar la introducción en Uruguay del proceso industrial de la madera modificada químicamente-

Sin embargo, se constató la viabilidad económica y financiera de la producción de madera termotratada en Uruguay por parte de un aserradero preexistente o en forma independiente (ANEXO 2).

La madera modificada térmicamente se está produciendo en Uruguay a nivel industrial procesando madera de pino y eucalipto.

Es de interés continuar con la optimización del proceso, fundamentalmente para madera de eucalipto por medio del estudio de:

- Tratamiento térmico sobre la madera de *Eucalyptus grandis* para uso no estructural en fachada y decks

10 BIBLIOGRAFÍA

ABPM, 2018. *Associação Brasileira de Preservadores de Madeira*. [En línea] Available at: <https://www.abpm.com.br/quem-somos/#1530723449153-91eb88bf-d5f0> [Último acceso: 17 03 2025].

Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE), 2019. *Producir y recuperar postes, otra tarea de UTE*. [En línea] Available at: <https://www.ute.com.uy/noticias/producir-y-recuperar-postes-otra-tarea-de-ute> [Último acceso: 2025].

ALTANER, C., 2022. PRESERVATIVE TREATED TIMBER PRODUCTS IN NEW ZEALAND. *CELLULOSE CHEMISTRY AND TECHNOLOGY*, 56(7-8), pp. 705-716.

American Wood Protection Association, 2019. *AWPA book of standards*. Birmingham: AWP.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009. *UNE-EN 15228. Madera estructural tratada con un producto protector contra los ataques biológicos*. Madrid: AENOR.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2014. *UNE EN 335:2014. Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera Clases de uso: definiciones, aplicación a la madera maciza y a los productos derivados de la madera..* Madrid: AENOR.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2014. *UNE-EN 599-1:2010+A1:2014. Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Eficacia de los protectores de la madera determinada mediante ensayos biológicos. Parte 1: Especificaciones para las distintas clases de uso..* Madrid: AENOR.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2016. *UNE EN 350: Durabilidad de Madera y productos derivados de madera. Ensayos y clasificación de la resistencia a los agentes biológicos de la madera y de los productos derivados de la madera..* Madrid: AENOR.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRESERVADORES DE MADEIRA (ABPM), 2. *Normas e Legislação*. [En línea] [Último acceso: 2025].

Australian Government. Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, s.f. *Accepted timber permanent preservative formulations*. [En línea] Available at: https://www.agriculture.gov.au/biosecurity-trade/import/goods/timber/approved-treatments-timber/permanent-preservative-treatment/approved-timber-permanent-preservative-formulations#_217---copper-boric-acid-and-polymeric-biocide-timber-impregnation-preserv [Último acceso: 2024].

Australian-Government, 2025. *Approved Timber Permanent Preservative Formulations*. [En línea] Available at: https://www.agriculture.gov.au/biosecurity-trade/import/goods/timber/approved-treatments-timber/permanent-preservative-treatment/approved-timber-permanent-preservative-formulations#_217---copper-boric-acid-and-polymeric-biocide-timber-impregnation-preserv

[trade/import/goods/timber/approved-treatments-timber/permanent-preservative-treatment/approved-timber-permanent-preservative-formulations](https://www.agriculture.gov.au/biosecurity-trade/import/goods/timber/approved-treatments-timber/permanent-preservative-treatment/approved-timber-permanent-preservative-formulations)
[Último acceso: 12 03 2025].

Australian-Government, 2025. *Department of Agriculture, Fisheries and Forestry*. [En línea] Available at: <https://www.agriculture.gov.au/biosecurity-trade/import/goods/timber/approved-treatments-timber/permanent-preservative-treatment/approved-timber-permanent-preservative-formulations>
[Último acceso: 12 03 2025].

Borges, C. C. y otros, 2018. NANOPARTICLES-BASED WOOD PRESERVATIVES: THE NEXT GENERATION OF WOOD PROTECTION?. *CERNE*, 24(4), pp. 397-407.

Böttcher H, Kallies KH, Trepte J (2000) Holzschutzmittel. German patent DE19833479A1

Brennan, S., 2024. *Foresight*. [En línea] Available at: <https://www.useforesight.io/news/eu-commission-renews-approval-of-propiconazole-for-biocidal-use-with-restrictions>
[Último acceso: 27 12 2024].

BS, 2007. *BS EN 351-1:2007, "Durability of wood and wood-based products - Preservative-treated solid wood"*, Londres: British Standard.

Bulfe, N. M. L. & Fernández, . M. E., 2017. Anatomía funcional del leño juvenil de *Pinus taeda* L: variabilidad genotípica y plasticidad anatómica ante déficit hídrico. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 116(2), pp. 225-240.

Calonego, F. W., E. T.D. Severo, y A. W. Ballarin. 2012. "Physical and mechanical properties of thermally modified wood from *E. grandis*". *European Journal of Wood and Wood Products* 70(4): 453–60. doi:10.1007/s00107-011-0568-5.

Calonego, Fred Willians, Elias Taylor Durgante Severo, y João Vicente de Figueiredo Latorraca. 2014. "Effect of thermal modification on the physical properties of juvenile and mature woods of *Eucalyptus grandis*". *Floresta e Ambiente* 21(1): 108–13. doi:10.4322/floram.2014.004.

Cantera, Leandro, Raquel Alonso, Sandra Lupo, Lina Bettucci, Agostina Amilivia, Jorge Martínez, y Andrés Dieste. 2022. "Decay resistance of thermally modified *Eucalyptus grandis* wood against wild strains of *Trametes versicolor* and *Pycnoporus sanguineus*". *Wood Material Science and Engineering* 17(6): 478–87. doi:10.1080/17480272.2021.1892185.

Cantera, Leandro. 2020. *Thermal Modification of Eucalyptus grandis and Pinus Taeda Wood*. Facultad de Ingeniería: Tesis de Maestría en Ingeniería Química.

Cao, X., Morrell, J. & Hansen, E., Jan, 2012. The Chinese Treated Wood Market. Current Status and Future Perspectives. *Forests Products Journal*, p. 644.648.

Clawson, R. J., 2015. *Buffered Amine Oxide Treatment Systems for Imparting Water Based Azoles/Insecticides in Douglas Fir and Eucalyptus*. Sweden, The International Research Group on Wood Protection.

Comisión-Europea, 2004. "Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - common rules and rules for buildings", The European Union per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC, Bruselas: Comisión Europea.

Comisión-Europea, 2011. Reglamento (UE) 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo, por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción y se deroga la Directiva 89/106/CEE del Consejo, Bruselas: Reglamento del Parlamento Europeo.

Comisión-Europea, 2020. 2020/C 375/1, Recogida separada de los residuos peligrosos de origen doméstico, Bruselas: Comisión Europea.

Comisión-Europea, 2020. CE 2020/2009, por la que se establecen las conclusiones sobre las mejores técnicas disponibles (MTD), con arreglo a la Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre las emisiones industriales, incluida la conservación de la madera. *Diario Oficial de la Unión Europea*, Volumen L 414, pp. 19-78.

Comisión-Europea, 2020. Comunicación de la Comisión - Recogida separada de los residuos peligrosos de origen doméstico (2020/C 375/01), s.l.: s.n.

Comisión-Europea, 2022. CE 2022/ 1496, por la que se retrasa la fecha de expiración de la aprobación del Tebuconazol para su uso en biocidas del tipo #8, Bruselas: Comisión Europea.

Comisión-Europea, 2022. CE 2022/1484, por la que se retrasa la fecha de expiración de la aprobación del carbonato de didecildimetilamonio para su uso en biocidas del tipo de producto 8, Bruselas: Comisión Europea.

Comisión-Europea, 2022. CE 2022/1488, por la que se retrasa la fecha de expiración de la aprobación del K-HDO para su uso en biocidas del tipo de producto #8, Bruselas: Comisión Europea.

Comisión-Europea, 2024. CE 2024/ 2964, por el que se aprueba la sustancia productos de reacción del ácido bórico con la didecilamina y el óxido de etileno (betaína polimérica) como sustancia activa existente para su uso en biocidas del tipo 8, Bruselas: Comisión Europea.

Comisión-Europea, 2025. CE 2025/ 434, por la que se retrasa la fecha de expiración de la aprobación del Etofenprox para su uso en biocidas del tipo #8, Bruselas: Comisión Europea.

Comisión-Europea, 2025. CE 2025/450, por la que se retrasa la fecha de expiración de la aprobación del IPBC para su uso como biocida , Bruselas: Comisión Europea.

Comunidad-Europea, 1994. Directiva 94/60/CE del Parlamento Europeo por la que se modifica por 14ta vez la Directiva 76/769/CEE que limita la comercialización y el uso de determinadas sustancias y preparados peligrosos. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, pp. 365/ 1-9.

Comunidad-Europea, 2003. CE 2003/2, que limita la comercialización y el uso de Arsénico, Bruselas: Diario Oficial de la Comisión Europea.

COOPERACION TECNICA MERCOSUR (SGT6) ; GTZ, 2007. *Guía de Buenas Prácticas en Impregnación de Madera. Tomo 1: Seguridad y Salud Ocupacional*, Montevideo: Artes Gráficas.

COOPERACION TECNICA MERCOSUR (SGT6) ; GTZ, 2007. *Guía de Buenas Prácticas en Impregnación de Madera. Tomo 2. Gestión Ambiental y Producción más Limpia*, Montevideo: Artes Gráficas.

Deskera, 2025. *Understanding the Latest Regulations for Woods Manufacturing*. [En línea] Available at: <https://www.deskera.com/blog/understanding-the-latest-regulations-for-woods-manufacturing/> [Último acceso: 13 03 2025].

DINAVI-MVOTMA, 2011. *Esándares de Desempeño y Requisitos para la Viviena de Interés Social*, Montevideo: Dirección Nacional de Vivienda - Ministerio de Vivienda.

DRNR-MAPA, 1966. *Decreto #58.016/ 1966, sobre obligatoriedad de preservasao da madeira usada para servicios públicos*, Brasilia: Departamento de Recursos Naturais Renováveis - Ministerio do Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Brasil.

ECHA, 2024. *Understanding BPR*. [En línea] Available at: <https://echa.europa.eu/regulations/biocidal-products-regulation/understanding-bpr> [Último acceso: 13 03 2025].

Emmerich, L., Militz, H. 2020. Study on the impregnation quality of rubberwood (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) and English oak (*Quercus robur* L.) sawn veneers after treatment with 1,3-dimethylol-4,5- dihydroxyethyleneurea (DMDHEU) *Holzforschung*, vol. 74, no. 4, pp. 362-371. <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0110>

Emmerich, L., Bollmus, S., Militz, H. 2019. Wood modification with DMDHEU (1,3-dimethylol-4,5-dihydroxyethyleneurea)—State of the art, recent research activities and future perspectives. *Wood Mater. Sci. Eng.*, 14, 3–18.

EPA, 2021. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants: Wood Preserving Area Sources Technology Review; Technical Correction for Surface Coating of Wood Building Products. 40 CFR Part 63.. *Authentified U.S. Government Information*.

EPA, 2024. *Environmental Protection Agency*. [En línea] Available at: <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/pentachlorophenol#:~:text=Basic%20Information,supervision%20of%20a%20certified%20applicator> [Último acceso: 10 03 2025].

EPA, 2024. *Overview of Wood PReservative Chemicals*. [En línea] Available at: <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/overview-wood-preservative-chemicals> [Último acceso: 12 03 2025].

EPA, 2025. *Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) Laws and Regulations*. [En línea]

Available at: <https://www.epa.gov/rcra>
[Último acceso: 13 03 2025].

Esteves, Bruno, António Velez Marques, Idalina Domingos, y Helena Pereira. 2007. "Influence of steam heating on the preproperties of pine and eucalypt wood". *Wood Science and Technology* 41: 193–207.

European Wood Protection Association, s.f. *How to specify treated wood*. [En línea] Available at: <https://wei-ieo.org/specify-design-treated-wood/how-to-specify-treated-wood>
[Último acceso: 2024].

European-Comission, 2011. Amending Directive 98/8/EC of the European Parliament and of the Council to include creosote as an active substance in Annex I. *Official Journal of the European Union*.

European-Comission, 2022. *CE 2022/1950, renewing the approval of Creosote as active substance for use in biocidal product type #8*, Brussels: Official Journal of the European Union.

European-Union, 2006. Commission Directive 2006/139/EC amending Council Directive 76/769/EC as regards restrictions on the marketing and use of Arsenic compounds. *Official Journal of the European Union*, pp. 384/ 94-97.

European-Union, 2023. Commission implementing regulation 2023/2596/EU renewing the approval of Propiconazole as an active substance for use in biocidal product-type #8 in accordance with regulation EU 528/2012. *Official Journal of the European Union*, pp. 1-9.

European-Union, 2024. *Industrial and Livestock-rearing Emissions*. [En línea] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/industrial-and-livestock-rearing-emissions.html?fromSummary=19>.
[Último acceso: 13 03 2025].

Fengel, D., y G. Wegener. 1984. *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Berlin: Gruyter.

Freeman, M. H., Nicholas, D., Renz, D. & Buff, R., 2004. PXTS: A Metal Free Oligomer Wood Preserving System. *THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PRESERVATION*, Volumen IRG/WP 04-30350 .

Freeman, M. H., Shupe, T. F., Vlosky, R. P. & Barnes, H. M., 2003. Past, Present, and Future of the Wood Preservation Industry. *Forest Products Journal*, October.53(10).

Goettsche, R., 2003. Protectores de madera con Cu-HDO. Una alternativa más respetuosa para el tratamiento con autoclave de la madera. *Boletín de Información Técnica*, Issue 222.

Governo-do-Brasil, 2021. *Decreto #10.833/ 2021, sobre a Pesquisa, Producao, Rotulagem, Transporte, Armazenamento, Comercializacao, e Fiscalizacao Agrotóxicos, seus Componentes e afins*, Brasília: Ministerio do Agricultura, Pecuaria, e Abastecimento (MAPA)- Ministerio do Salud (MS)- Ministerio do Meio Ambiente (MMA).

Grand View Research, 2023. *Wood Preservatives Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (Water Based, Solvent Based, Oil Based), By Application (Residential, Commercial, Industrial), By Region, And Segment Forecasts, 2024 - 2030*. [En línea] Available at: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/wood-preservatives-market-report> [Último acceso: 2024].

Härtner, H., Schmitt, S., Cui, F. & Barnes, M., 2008. *Polymeric Betaine as a Wood Preservative*. Costa Rica, IRG SECRETARIAT.

Helmer, D. & Leithoff, H., 2008. *CARBON BASED WOOD PRESERVATIVES: APPLICATIONS AND NEW OPPORTUNITIES*. s.l., s.n., pp. 120-129.

Hernández, M., s.f. *Normas técnicas para cumplir con los requisitos para construir en madera*. [En línea] Available at: <https://www.madera21.cl/normas-tecnicas-para-cumplir-con-los-requisitos-para-construir-en-madera/> [Último acceso: 2025].

higieneambiental.com, 2024. *Higiene Ambiental*. [En línea] Available at: <https://higieneambiental.com/protectores-de-la-madera> [Último acceso: 10 03 2025].

Hill, Callum. 2006. *Wood Modification Wood Modification. Chemical, Thermal and Other Processes*. ed. Christian Stevens. John Wiley & Sons, Ltd. . doi:10.1002/0470021748.fmatter.

IBAMA, 2006. *Instrucao Normativa #132/ 2006, sobre adotar medidas restritivas à os produtos destinados à preservação de madeiras Lindano e Pentaclorofenol*, Brasília: IBAMA - ANIVSA.

IBAMA-MMA, 1989. *Portaria Interministerial 292/ 1989, Sistemática Integrada para Disciplinamento de Atividades Relacionadas a Preservacao de Madeiras*, Brasília: Ministerio do Meio Ambiente.

Impra Wood Protection Ltd., s.f. *Vacuum Pressure Impregnation*. [En línea] Available at: <https://impra.co.uk/impralit/vacuum-pressure-impregnation> [Último acceso: 2024].

INN, I. N. d. N., 2019. NCh819 - Madera preservada - Pino radiata - Clasificación según uso y riesgo en servicio y muestreo. *Norma Oficial Chilena*.

Instituto Brasileiro do MeioAmbiente e dos Recursos Naturais, 2024. *Preservativos de madeiras*. [En línea] Available at: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/preservativos-de-madeiras/arquivos/2024/20240424_produtos_preservativos_de_madeiras_registrados_a_bril_2024.pdf [Último acceso: 2024].

International Standandards Organization (ISO), 2007. *Durability of wood and wood-based*. ISO 21887:2007(E), Ginebra: ISO.

International-Code-Council, 2021. *International Building Code*, s.l.: International Code Council.

IRAM, 1998. *Preservación de maderas - Maderas preservadas mediante procesos con presión en autoclave*, s.l.: Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).

Japan Wood Protection Association, s.f. JWP. [En línea] Available at: <http://www.mokuzaihozon.org/english/index.html> [Último acceso: 2024].

Järvinen, J., Ilgin, H. & Karjalainen, 2022. Wood Preservation Practices and Future Outlook: Perspectives of Experts from Finland. *fORESTS*, 13(7).

Jiang, M., 2004. *Wood preservation and specifications in China*. Ljubljana, Slovenia, IRG SECRETARIAT.

Jones, Dennis, y Dick Sandberg. 2020. "A Review of Wood Modification Globally – Updated Findings from COST FP1407". *Interdisciplinary Perspectives on the Built Environment* 1. doi:10.37947/ipbe.2020.vol1.1.

Khademibami, L. & Bobadilha, G. S., 2022. Recent Developments Studies on Wood Protection Research in Academia: A Review. *Frontiers in Forests and Global Change*, Marzo, Volumen 5, p. 18.

Kim, Dae-Young, Yoshiharu Nishiyama, Masahisa Wada, Shigenori Kuga, y Takeshi Okano. 2001. "Thermal Decomposition of Cellulose Crystallites in Wood". *Holzforschung* 55(5): 521–24. doi:doi:10.1515/HF.2001.084.

Koch, D. & Manning, M., 2021. *Copper Naphthenate: A Treater's Perspective*. s.l., AWP, pp. 63-70.

Konkler, M. J. & Morrell, J. J., 2023. *Performance of Selected Wood-Protection-Coated Lumber Products in Hilo, Hawaii*, s.l.: s.n.

Langrish, T. A. C. & Walker, J. C. F., 1993. Transport processes. En: *Primary Wood Processing. Principles and practice*. s.l.:Chapman & Hall, pp. 121-151.

Lebow, S., 2006. *Preservative Treatments for Building Components*. Marshall Ct., Forest Products Society.

Lebow, S., 2007. *Preservative treatments for building components*. New Orleans, LA, p. 57–64.

Leguizamon, G. & Malavasi, G., 2024. Normalización en Preservación de Madera. XXXVIII *Jornadas Forestales de Entre Ríos*, pp. 1-4.

Liu, H., Zhang, . Y., Yang, L. & Zhihui , W., 2018. Effects of Ultrasound Pretreatment on Microstructure and Drying Characteristics of *Eucalyptus urophylla* × *E.grandis*. *BioResources*, 13(3), pp. 5953-5964.

Lorenzo, D. y otros, 2009. *Study of the natural durability of Eucalyptus grandis wood from Argentina..* Stockholm, Sweden, IRG SECRETARIAT .

Madera21, 2020. *Expertos actualizan 8 normas relacionadas con la construcción en madera*. [En línea]
Available at: <https://www.madera21.cl/blog/2020/01/22/minvu-madera21-actualizacion-normas-nch-madera/>
[Último acceso: 27 12 2024].

Mantanis, G. 2017. Chemical modification of wood by acetylation or furfurylation: a review of the present scaled-up technologies. *BioRe-sources* 12 (3): 115-122. - doi: 10.15376/biores.12.2.Mantanis

Markets and Markets, 2020. *Wood Preservatives Market by Formulation (Water-Based, Oil-Based, Solvent-Based), Application (Residential, Commercial, Industrial), and Region (North America, APAC, Europe, South America, Middle East and Africa) - Global Forecast to 2025*. [En línea]
Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/wood-preservative-market-26944487.html>
[Último acceso: 2024].

Matra, 2025. *Matra*. [En línea]
Available at: <https://matra.com.uy/normativa-de-retencion-en-el-uruguay/>
[Último acceso: 10 03 2025].

MIEM, 2018. *IMPO - Normativas y Avisos Legales del Uruguay*. [En línea]
Available at: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-originales/157-2018>
[Último acceso: 10 03 2025].

Militz, H. 2020. Wood modification research in Europe. *Holzforschung*, 74(4): 333–333.

Militz, H., Schaffert, S., Peters, B. C., Fitzgerald, C. 2011. Termite resistance of DMDHEU-treated wood. *J. Wood Science and Technology*, 45(3): 547–557.

Militz, H., y M. Altgen. 2014. "Processes and properties of thermally modified wood manufactured in Europe". *ACS Symposium Series* 1158: 269–85. doi:10.1021/bk-2014-1158.ch016.

Ministerio de Economía, 2023. Reglamento que establece los requisitos de rotulación de la madera estructural para la construcción. *Diario Oficial de la República de Chile*, Issue 43.658, pp. 1-5.

Ministerio de Salud de Chile, 2004. *Decreto 148/ 2004. Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos*, Santiago: Ministerio de Salud.

Ministry of Environment of Denmark, 2024. *Active Substances Included in Annex I under Product-Type #8: Wood Preservatives*. [En línea]
Available at: <https://eng.mst.dk/chemicals/biocides/application-in-accordance-with-the-bpr/when-to-apply/check-the-status-of-active-substances/active-substances-included-in-annex-i/wood-preservatives-pt-8>
[Último acceso: 13 03 2025].

Morrell, J. J., 2019. PROTECTION OF WOOD: A GLOBAL PERSPECTIVE ON THE FUTURE. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 10(1), pp. 81-94.

North American Wood Pole Council, s.f. *Pole principles. Guidance for specifying and using preservative-treated wood poles.* [En línea] Available at: https://woodpoles.org/portals/2/documents/PP_Preservatives.pdf [Último acceso: 2024].

NZTPC, 2025. *HSNO Requirements.* [En línea] Available at: <https://www.nztpc.co.nz/hsno-requirements> [Último acceso: 12 03 2025].

NZTPC, 2025. *Why Treat Timber?.* [En línea] Available at: <https://www.nztpc.co.nz/why-treat-timber> [Último acceso: 12 03 2025].

Osawa, T., Ohmura, W. & Hiroshi, K., 2020. *Future development of durability assessment of wood, according to typical usage of preservative-treated wood and naturally durable wood in Japan.* Sweden, THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PROTECTION.

Pepin, S., Blachet, P. & Landry, V., 2019. Performance of White Pine and White Spruce Treated with Organic Fungicides Using an Aqueous Buffered Amine Oxide Preservation System. *Bioresources*, 14(1), p. 264.288.

Peraza Sánchez, F., 2001. *Protección Preventiva de la Madera.* Madrid: AITIM.

Platten, W. E. y otros, 2014. *Release of Micronized Copper Particles from Pressure-Treated Wood Products*, Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.

Rava, A., en revisión. *EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD DE LA MADERA DE Eucalyptus grandis PARA FABRICACIÓN DE POSTES DE TENDIDO ELÉCTRICO*, Montevideo: s.n.

Reinprecht, L. , L., 2016. *Wood Deterioration, Protection, and Maintenance..* 1a Edición ed. Hoboken,: John Wiley & Sons Ltd.

Ross, A. & Cutler, K., 2011. *Method of employing enhanced penetration of wood preservatives to protect wood and a related solution.* U.S., Patente nº 20120258248 A1.

Ross, A., Marks, B. & Ward, H., 2006. *Synergistic combination of fungicides to protect wood and wood based products and wood treated by such combinations as well as methods of making the same.* U.S., Patente nº 7,056,919.

Rowell, R.M. 1983. Chemical modification of wood. *Forest Products Abstracts*, 6(12), 363-382.

SAG-Ministerio-de-Agricultura, 2023. *Listado sistematizado de plaguicidas prohibidos con sustancias activas*, Santiago: Servicio Agrícola y Ganadero - Ministerio de Agricultura - Gobierno de Chile.

Salminen, E., Valo, R., Korhonen, M. & Jernlås, R., 2014. *Wood preservation with chemicals. Best Available Techniques (BAT).* Copenhagen: Nordisk Ministerråd.

Sandberg, D., Karlsson, O., Kutnar, A., Jones, D. 2021. *Wood Modification Technologies. Principles, Sustainability, and the Need for Innovation*; CRC Press: Baton Rouge, FL, USA. ISBN 978-1-138-49177-9.

Sandberg, Dick, Andreja Kutnar, y George Mantanis. 2017. "Wood modification technologies - A review". *IForest* 10(6): 895–908. doi:10.3832/for2380-010.

Schultz, T. & Nicholas, D., 2011. Chemical Wood Preservative Systems in North America. En: K. M. B. a. C. M. D. Jeffrey J. Morrell, ed. *Managing Treated Wood in Aquatic Environments*. s.l.:Forest Products Society.

Schultz, T. P. y otros, 2008. *Development of Wood Preservatives. Efficacy, Environmental, and Health Issues*. Washington DC: American Chemical Society.

Sedillo, N., 2023. *Addressing Public Utility Specifications*. s.l., American Wood Protection Association, pp. 109-111.

Siau, J. F., 1984. Wood structure and chemical composition.. En: *Transport process in wood*. Berlin: Springer Verlag, pp. 35-72.

Smilak, R., Haudenschild, C., y Smilak, K. 2000. Enhancing strength, moisture resistance and fire -resistance of wood, timber, lumber similar plant derived construction and building materials, and other cellulosic materials. U.S. Patent No. 6,040,057 (45).

Stockholm-Convention, 2025. *Centro Coordinador Regional de Convenios de Basilea y Estocolmo en América Latina y el Caribe*. [En línea] Available at: <https://ccbasilea-crestocolmo.org.uy/estocolmo/> [Último acceso: 10 03 2025].

Syngenta, 2021. *Servicio Agrícola y Ganadero. Ministerio de Agricultura. Chile*. [En línea] Available at: https://www.sag.gob.cl/sites/default/files/insegar_25_wg_01-11-2021.pdf [Último acceso: 2025].

TimberSil, 2011. *Performance Bulding Supply*. [En línea] Available at: http://performancebuildingsupply.com/wp-content/uploads/2011/04/TimberSil-Comprehensive-Brochure-1_08.pdf [Último acceso: 2025].

UNEP, 2021. *Stockholm Convention - Guidance on Alternatives to PentaChloroPhenol (PCP)*, Stockholm: United Nation Environmental Program.

United States Environmental Agency, 2024. *Ingredients Used in Pesticide Products. Pentachlorophenol*. [En línea] Available at: <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/pentachlorophenol#:~:text=Basic%20Information,supervision%20of%20a%20certified%20applicator> [Último acceso: Marzo 2025].

United States Environmental Protection Agency, 2011. *Summary of Product Chemistry, Environmental Fate, and Ecotoxicity Data for the 3-iodo-2-propynyl butylcarbamate (IPBC)*, s.l.: U.S. EPA.

United States Environmental Protection Agency, 2021. *A Qualitative Assessment on the Use, Usage, and Benefits of Chromated Arsenicals (PC #021101, PC #006801, and PC #006802) as Wood Preservatives*, Washington D.C.: United States Environmental Protection Agency.

United States Environmental Protection Agency, 2021. *A Qualitative Assessment on the Use, Usage, and Benefits of Pentachlorophenol (PC#063001) as a Wood Preservative*, Washington D.C.: United States Environmental Protection Agency.

United States Environmental Protection Agency, 2024. *Summary of the Clean Air Act*. [En línea]

Available at: <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-air-act>
[Último acceso: 13 03 2025].

United States Environmental Protection Agency, 2024. *Summary of the Clean Water Act*. [En línea]

Available at: <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-water-act>
[Último acceso: 13 03 2025].

United States Environmental Protection Agency, 2024. *Summary of the Toxic Substances Control Act*. [En línea]

Available at: <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-toxic-substances-control-act>
[Último acceso: 13 03 2025].

Vidal, J. M., Evangelista, W. V., de Castro Silva, J. & Jankowsky, I. P., 2015. PRESERVAÇÃO DE MADEIRAS NO BRASIL: HISTÓRICO, CENÁRIO ATUAL E TENDENCIAS. *Ciência Florestal*, jan-mar, 25(1), pp. 257-271.

Ward, H., Bender, R. & Ross, A., 2003. *Synergistic Combination of Insecticides to Protect Wood and Wood-based Products from Insect Damage*. U.S., Patente nº 6582732 B1.

Western Wood Preservers Institute, 2023. *Preserved Wood*. [En línea]

Available at: https://preservedwood.org/wp-content/uploads/2024/10/PT_infrastructure.pdf
[Último acceso: Mayo 2024].

Wolman, s.f. *protection-of-wood-based-materials*. [En línea]

Available at: <https://www.wolman.de/en/products/protection-of-wood-based-materials/xylogen-30-f/-wolsit-f-15t>
[Último acceso: 2025].

Wolman, s.f. *Wolman*. [En línea]

Available at: <https://www.wolman.de/en/infocenter-wood/vacuum-pressure-impregnation/oscillating-pressure-process>
[Último acceso: 2024].

Wood Protection Association, 2023. *Code of Practice: Industrial Wood Preservation*. 3a ed. West Yorkshire: Wood Protection Association.

WPC, 2015. *National Building Code of Canada (NBC). Requirements for Treated Wood*. [En línea]

Available at: <https://woodpreservation.ca/en/residential-sitemap/building-code-requirements/>
[Último acceso: 13 03 2025].

10.1 REFERENCIAS Y COMENTARIOS DEL CAPÍTULO 6. ASPECTOS DE SOSTENIBILIDAD

- [11] Khademibami, L., & Bobadilha, G. S. (2022). Recent developments studies on wood protection research in academia: A review. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.793177>
- [12] U.S. EPA Ingredients Used in Pesticide Products - Overview of Wood Preservative Chemicals <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/overview-wood-preservative-chemicals>
- [13] U.S. EPA (2008) Reregistration Eligibility Decision for Creosote. EPA 739-R-08-007 https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/reregistration/red_PC-025004_25-Sep-08.pdf
- [14] Ingredients Used in Pesticide Products - Creosote <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/creosote>
- [15] Ingredients Used in Pesticide Products - Pentachlorophenol <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/pentachlorophenol>
- [16] U.S. EPA (2008) Reregistration Eligibility Decision for Pentachlorophenol EPA 739-R-08-008 https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/reregistration/red_PC-063001_25-Sep-08.pdf
- [17] ECHA Substance Infocard - Naphthenic acids, copper salts <https://echa.europa.eu/es/substance-information/-/substanceinfo/100.014.234>
- [18] U.S. EPA (2017) Copper Naphthenate Registration Review Preliminary Risk Assessment. EPA-HQ-OPP-2010-0455 <https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2010-0455-0009/content.pdf>
- [19] Khademibami, L., & Bobadilha, G. S. (2022). Recent developments studies on wood protection research in academia: A review. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.793177>
- [100] U.S. EPA (2022) Chromated Arsenicals and Dichromic Acid Interim Registration Review Decision Case Numbers 0132 and 5012. <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OPP-2015-0349-0030>
- [111] U.S. EPA (2021). Response to Science-Based Public Comments on the Chromated Arsenicals and Dichromic Acid (CCA) Preliminary Interim Decision. <https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2015-0349-0030/content.pdf>
- [121] Hay tres tipos de CCA (A, B y C) según el contenido relativo de cromo, cobre y arsénico. El Tipo C contiene 47,5% Cr (como CrO₃), 18,5% Cu (como CuO) y 34,0% As (como As₂O₅).
- [131] El ACZA se incluyó en la evaluación a pesar de que los registros disponibles indican que casi no se utiliza en USA. El cromato ácido de cobre (ACC) era otro candidato para evaluar, pero la EPA lo excluyó debido a que ya no figuraba como preservante en los estándares la Asociación Americana de Protección de la Madera (AWPA) y no hay registros de su uso como mejor tratamiento disponible.
- [141] U.S. EPA (2021) A Qualitative Assessment on the Use, Usage, and Benefits of Chromated Arsenicals (PC #021101, PC #006801, and PC #006802) as Wood Preservatives <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OPP-2015-0349-0018>
- [151] U.S. EPA (2021) A Qualitative Assessment on the Use, Usage, and Benefits of Pentachlorophenol (PC#063001) as a Wood Preservative. <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OPP-2014-0653-0052>
- [161] Menzies (1951) Organismos perforantes de las costas argentinas. II. La presencia de *Limnoria tripunctata* (Isopoda, Limnoriidae) en el puerto de Mar del Plata. <https://aquadocs.org/handle/1834/26668?show=full>
- [171] Hashimoto, S., et al. (2004). Life cycle assessment of preservative-treated wood: A case study of Wooden Bridge. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 2004(755), 45–56. https://doi.org/10.2208/jscej.2004.755_45
- [181] Arch Wood Protection, Inc. (2013). Environmental Life Cycle Assessment of CCA-Treated Utility Poles Comparisons to Concrete, Galvanized Steel, and Fiber-Reinforced

https://woodpoles.org/portals/2/documents/LCA_CCAPOleSummary.pdf

[19] Bolin, C.A. & Smith, S.T. (2011). Life cycle assessment of pentachlorophenol-treated wooden utility poles with comparisons to steel and concrete utility poles. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.019>

[20] Freeman M.H.; McIntyre C. (2008) A comprehensive review of copper-based wood preservatives with a focus on new micronized or dispersed copper systems. November 2008. Forest Products Journal 58(11):6-27

[21] Cushing, C.A. et al. (2007) Human health risk evaluation of ACQ-Treated Wood. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 13(5), 1014–1041. <https://doi.org/10.1080/10807030701506173>

[22] En Freeman & McIntyre (2008): Archer, K. and Preston, A. (2006). An overview of copper based wood preservatives. Wood protection 2006. <http://www.forestprod.org/woodprotection06archer.pdf>

[23] En Freeman & McIntyre (2008): Humar et al. (2005) Influence of acidification of CCB (Cu/Cr/B) impregnated wood on fungal copper tolerance. Chemosphere. 58(6): 743-749

[24] Freeman & McIntyre (2008)

[25] U.S. EPA (2006). Reregistration Eligibility Decision for Aliphatic Alkyl Quaternaries (DDAC). EPA739-R-06-008 August 2006.

[26] En el caso de los azoles de cobre, se emplean triazoles (3 nitrógenos).

[27] U.S. EPA (2021) Tebuconazole Human Health and Ecological Draft Risk Assessment. EPA-HQ-OPP-2015-0378. <https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2015-0378-0020/content.pdf>

[28] U.S. EPA (2006) Registration Eligibility Decision (RED) for Propiconazol. EPA 738R-06-027 https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/reregistration/red_PC-122101_18-Jul-06.pdf

[29] En escenario de 3 muelles con una superficie total de 21,6 m² (0,22% del cuerpo de agua) o más se encuentren en un cuerpo de agua modelado.

[30] Operarios de pulverización /mezcladores, de productos químicos y de tanques de inmersión.

[31] Los metabolitos de triazol libres: 1,2,4-triazol, triazol alanina y triazol acético ácido.

[32] U.S. EPA (2022). Propiconazol: Revised Human Health Draft Risk Assessment of the Conventional Uses to Support Registration Review. <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OPP-2015-0459-0074>

[33] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302596

[34] <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.056.441>

[35] https://www.wb6cif.eu/wp-content/uploads/2022/12/CELEX_32022D2298_EN_TXT.pdf

[36] <https://echa.europa.eu/documents/10162/8aa74693-d291-9eb7-ecfe-1a21a4f41cf2>

[37] En Freeman & McIntyre (2008): Lebow (2007) Preservative treatments for building components. www.fpl.fs.fed.us/documents/pdf2007/fpl_2007_lebow001.pdf

[38] U.S. EPA (2021). Copper 8-quinolinolate/PC 024002 Human Health and Ecological Draft Risk Assessment DP No. 461722. <https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2010-0454-0012/content.pdf>

[39] Platten, W. et al. (2014) Release of Micronized Copper Particles from Pressure Treated Wood Products. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-14/365. <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100LJWI.pdf>

[40] <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2015.02.018>

[41] <http://dx.doi.org/10.1186/s12951-016-0232-7>

[42] <http://dx.doi.org/10.1002/etc.3954>

[43] <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aaaaa7>

[44] <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31286265/>

[45] <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.068>

[46] <https://doi.org/10.1039/c9en01026b>

[47] <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117189>

[48] <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17308-6>

[49] <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100352>

[50] U.S. EPA (2017) Imidacloprid: Human Health Draft Risk Assessment for Registration Review. DP No. 437947. <https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2008-0844-1235/content.pdf>

[51] <https://www.regulations.gov/docket/EPA-HQ-OPP-2008-0844/document>

[52] https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2015-0378-0036/attachment_1.pdf

[53] <https://woodpreservation.ca/wp-content/uploads/2021/09/fox28.pdf>

[54] https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/ppls/075506-00007-20140718.pdf

[55] Todos los datos de propiedades fisicoquímicas y toxicológicas son de la base de datos PPDB de la Universidad de Hertfordshire. <https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/index.htm>

[56] <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OPP-2011-0865-1411>

[57] <https://www.epa.gov/endangered-species/final-national-level-listed-species-biological-evaluation-imidacloprid#executive-summary>

[58] <https://www3.epa.gov/pesticides/nas/neonicdraftbe/imidacloprid/appendix1-4.pdf>

[59] OCDE (2001) Emission Scenario Document for Wood Preservatives – Part 1. https://echa.europa.eu/documents/10162/983773/pt8_wood_preservatives_1_en.pdf/c25085cb-477f-457d-8e38-b9100cb643a7

[60] EFSA (2016) Peer review of the pesticide risk assessment for the active substance imidacloprid in light of confirmatory data submitted. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4607>

[61] U.S. EPA (2020) Clothianidin and Thiamethoxam. Proposed Interim Registration Review Decision Case Numbers 7620 and 7614. https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-01/documents/clothianidin_and_thiamethoxam_pid_final_1.pdf

[62] EU (2008) Thiamethoxam Assessment Report. Product-type 8 (Wood preservative) https://dissemination.echa.europa.eu/Biocides/ActiveSubstances/0054-08/0054-08_Assessment_Report.pdf

[63] <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.102.703>

[64] U.S. EPA (2016) Triadimefon and Triadimenol. Human Health Assessment Scoping Document in Support of Registration Review. 23 March 2016. DP Barcode: 0430121 <https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2016-0114-0003/content.pdf>

[65] U.S. EPA (2021) Triadimefon and Triadimenol. Human Health Assessment Scoping Document in Support of Registration Review. 16 June 2021. DP Barcode: D461209 <https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2016-0114-0033/content.pdf>

[66] U.S. EPA (2024) 2021 Human Health Benchmarks for Pesticides. <https://www.epa.gov/sdwa/2021-human-health-benchmarks-pesticides>

[67] PPDB⁵⁵ y CompTox <https://comptox.epa.gov/dashboard/chemical/properties/DTXSID3023897>

[68] Knaak et al. (1984) Percutaneous absorption of triadimefon in the adult and young male and female rat. [https://doi.org/10.1016/0041-008x\(84\)90117-0](https://doi.org/10.1016/0041-008x(84)90117-0)

[69] U.S. EPA (2009) Preventol A20 Preservative EPA Register Number: 39967-70. https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/ppls/039967-00070-20091201.pdf

[70] U.S. EPA (2006) Reregistration Eligibility Decision (RED) for Triadimefon and Tolerance Reassessment for Triadimenol. EPA 738-R-06-003. August 2006. https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/reregistration/red_PC-109901_1-Aug-06.pdf

[71] U.S. EPA (2021) Triadimefon: Draft Ecological Risk Assessment for Registration Review. DP Barcode: 460857 <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OPP-2016-0114-0035>

[72] NZ EPA (2022) Decision on application for approval to import or manufacture TNL3388 for release

https://www.epa.govt.nz/assets/FileAPI/hsno-ar/APP204223/APP204223_Final_Decision.pdf

[73] U.S. EPA (2018) Isothiazolinone White Paper. https://chemview.epa.gov/chemview/proxy?filename=8EHQ-18-21337_06.22.2018_Combined.pdf

[74] <https://www.epa.gov/pesticides/epa-extends-comment-period-isothiazolinones-draft-risk-assessments>

[75] <https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2014-0403-0009/content.pdf>

[76] <https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2014-0160-0008/content.pdf>

[77] <https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2013-0605-0050/content.pdf>

[78] Para plantas de tratamiento de madera, la exposición se considera de corto plazo de 1 a 30 días, mediano plazo de 30 días a 6 meses, y largo plazo a más de 6 meses.

[79] <https://www.mass.gov/info-details/pressure-treated-wood-use-in-playground-equipment>

[80] Basado en el documento guía de OCDE (2013) con escenarios de emisiones para preservantes de madera, se considera un muelle mediano (largo = 6 m; ancho = 1,2 m; espesor madera = 5 cm)

[81] El tratamiento de madera es el único uso del MIT/CMIT para el cual U.S. EPA no reporta las cantidades anuales empleadas en USA.

[82] U.S. EPA (2009) Reregistration Eligibility Decision (RED) for Permethrin. EPA 738-R-09-306. https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/reregistration/red_PC-109701_11-May-09.pdf

[83] 2nd Amendment to Permethrin Interim Registration Review Decision, Case Number 2510. <https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2011-0039-0158/content.pdf>

[84] Bifenthrin Interim Registration Review Decision Case Number 7402. EPA-HQ-OPP-2010-0384 <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/bifenthrin-reg-review-id.pdf>

[85] Bifenthrin: Revised Draft Human Health Risk Assessment for Registration Review. DP Barcode: D454914. <https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2010-0384-0279/content.pdf>

[86] EC (2010) Bifenthrin (PT8) Assessment Report. <https://echa.europa.eu/documents/10162/4b515dee-0d62-e286-7789-5e78c5d1348d>

[87] U.S. EPA (2011) Summary of Product Chemistry, Environmental Fate, and Ecotoxicity Data for the 3-iodo-2-propynyl butylcarbamate (IPBC) Registration Review Decision Document. <https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2011-0420-0004/content.pdf>

[88] EC (2008) IPBC Product-Type 8 (Wood Processing) Assessment Report. <https://echa.europa.eu/documents/10162/9d72fc6a-6a37-045e-7609-975327cca21d>

[89] No está explicitado si las anteriores exposiciones incluyen actividades post-aplicación en la industria (manipulación de almacén, pero al menos en algunas evaluaciones se las integra.

[90] U.S. EPA (2023) Chlorothalonil - Proposed Interim Registration Review Decision. Case Number 0097. Docket Number EPA-HQ-OPP-2011-0840. <https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2011-0840-0141/content.pdf>

[91] U.S. EPA (1999) Chlorothalonil – RED facts. EPA-738-F-99-008. https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/reregistration/fs_PC-081901_1-Apr-99.pdf

[92] <https://www.epa.govt.nz/news-and-alerts/alerts/vtas/>

[93] Helmer, D. & Leithoff, H. (2009) Carbon based wood preservatives: applications and new opportunities. CWP A Proceedings, 2009, 120-129 <https://woodpreservation.ca/wp-content/uploads/2021/09/helmer30.pdf>

- ^[94] <https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/Reports/1573.htm>
- ^[95] U.S. EPA (2006) 2-(Thiocyanomethylthio) benzothiazole (TCMTB) Risk Assessment. <https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2006-0320-0019/content.pdf>
- ^[96] U.S. EPA (2006) RED for 2-(Thiocyanomethylthio)- benzothiazole (TCMTB). EPA739-R-05-003 https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/reregistration/red_PC-035603_1-Aug-06.pdf
- ^[97] U.S. EPA (1994) RED for Sodium and Zinc Salts of 2-Mercaptobenzothiazole. EPA 738-R-94-027 <https://archive.epa.gov/pesticides/reregistration/web/pdf/2380.pdf>
- ^[98] U.S. EPA (2005) Registration of Polysylenol Tetrasulfide (PXTS) https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/cleared_reviews/csr_PC-006929_20-Dec-05_a.pdf
- ^[99] U.S. EPA (2006) Efficacy review: Verigard (PXTS) Blend D Wood Preservative; 75799-2. 10/3/06 https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/cleared_reviews/csr_PC-006929_3-Oct-06_a.pdf
- ^[100] U.S. EPA (2006) Review of Akzo Nobel's response to comments and questions related to two studies that had been submitted to the Agency for the proposed registration of PXTS. D323888 https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/cleared_reviews/csr_PC-006929_19-Jan-06_a.pdf
- ^[101] U.S. EPA (2024) Office of Pesticide Programs – Polyxylenol Tetrasulfide. https://ordspub.epa.gov/ords/pesticides/f?p=CHEMICALSEARCH:7:::1,3,31,7,12,25:P3_X_CHEMICAL_ID:3493
- ^[102] USDA (2006) Preservative-Treated Wood and Alternative Products in the Forest Service. <https://www.fs.usda.gov/t-d/pubs/pdfpubs/pdf06772809/pdf06772809dpi300.pdf>
- ^[103] U.S. EPA (2006) Report on the Food Quality Protection Act (FQPA) Tolerance Reassessment Eligibility Decision (TRED) for Boric Acid/Sodium Borate Salts. https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/reregistration/tred_PC-011001_1-Jul-06.pdf
- ^[104] U.S. EPA (2018) Registration Review Preliminary Risk Assessment for Zinc Borate. <https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2007-0675-0020/content.pdf>
- ^[105] EC (2009) Boric acid Product-Type 8 (Wood Processing) Assessment Report. http://dissemination.echa.europa.eu/Biocides/ActiveSubstances/0009-08/0009-08_Assessment_Report.pdf
- ^[106] U.S. EPA (2020) Registration Review Draft Risk Assessment for Polymeric Betaine. EPA-HQ-OPP-2013-0374-0031. <https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2013-0374-0031/content.pdf>
- ^[107] Barbero-López, A. et al. (2020) Bio-based Wood preservatives: their efficiency, leaching and ecotoxicity compared to a commercial wood preservative. *Science of the Total Environment* 753, 142013. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142013>
- ^[108] Meena, R.K. (2022) Hazardous effect of chemical wood preservatives on environmental conditions, ecological biodiversity and human being and its alternatives through different botanical: a review. *Environmental and Ecology* 40 (3): 1137-1143 <https://environmentandecology.com/wp-content/uploads/2024/06/MS15-3.pdf>
- ^[109] Calovi, M. et al. (2024) Recent advances in bio-based wood protective systems: a comprehensive review. *Appl. Sci.* 14, 736. <https://doi.org/10.3390/app14020736>
- ^[110] Khademibami, L. & Bobadilha, G.S. (2022) Recent developments studies on wood protection research in academia: a review. *Front. For. Glob. Change* 5:793177 <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.793177>
- ^[111] Gérardin, P. (2016) New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood – a review. *Annals of Forest Science* **73**: 559-570. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0531-4>

- [112] Rowell, R.M. (2006) Chemical modification of wood: a short review. *Wood Material Science and Engineering*, **1**: 29-33. <https://doi.org/10.1080/17480270600670923>
- [113] Candelier, K. and Dibiakova, J. (2020) A review on life cycle assessments of thermally modified wood. *Holzforschung* – August 2020. <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0102>
- [114] Hill, C.; Hughes, M.; Gudsell, D. (2021) Environmental impact of wood modification. *Coatings*, **11**: 366. <https://doi.org/10.3390/coatings11030366>
- [115] Jones, D. and Sandberg, D. (2020) A review of wood modification globally – updated findings from COST FP1407. *Interdisciplinary Perspectives on the Built Environment* – December 2020. <https://doi.org/10.37947/ipbe.2020.vol1.1>
- [116] Sandberg D, Kutnar A, Mantanis G (2017). Wood modification technologies – a review. *iForest* 10: 895-908. – <https://doi.org/10.3832/ifer2380-010>
- ¹¹⁷ Dong, Y. et al. (2020) Environmentally Benign Wood Modifications: A Review. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2020, **8**, 3532-3540. <https://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c00342>

ANEXO 1. ESTUDIO TECNOECONÓMICO DEL PRESERVANTE MCA

En este capítulo se presenta un estudio tecnoeconómico de una alternativa para el corto plazo para la impregnación en profundidad sustituyendo al CCA como preservante.

1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo al análisis FODA, realizado el estudio tecnoeconómico analizará los costos asociados a la instalación de una planta de impregnación en profundidad utilizando un sistema acuoso con azol de cobre micronizado_(MCA) como preservante. Como el objetivo en este análisis, es su utilización en la construcción con madera, se planteará el escenario de la utilización de madera del género *Pinus* tratada con MCA en viviendas.

2 ESTUDIO PRELIMINAR DE MERCADO

2.1 OFERTA Y DEMANDA EN URUGUAY

Como fue mencionado previamente, el mercado uruguayo consume aproximadamente 50.000 m³ de madera tratada por año, abarcando productos como postes, tablas y tirantes. De acuerdo a la Encuesta de Plantas de Impregnación realizada por la Dirección General Forestal (MGAP_DGF_2020), la producción nacional de tablas (en 12 plantas impregnadoras) en 2019 fue de 8108 m³. La madera utilizada para la impregnación de tablas correspondió a un 98 % al género *Pinus*, específicamente *Pinus taeda* y *Pinus elliottii*. De acuerdo con el informe "Lineamientos de diseño estructural para viviendas de entramado ligero construidas con maderas de pino y eucalipto de Uruguay" en el año 2023 se produjo 28.727 m³ de madera aserrada de pino, lo que muestra la variabilidad de la producción (Böthig et al., 2023). Por otro lado, dado la inespecificidad de los códigos arancelarios, no fue posible obtener datos sobre la importación de madera tratada, pero se considera que la cantidad de esta no es relevante a los efectos del estudio tecno económico.

Actualmente Uruguay cuenta con 13 plantas que realizan impregnación de madera, correspondiendo el 83% a madera impregnada con CCA, 10% a amonio cuaternario y borato de cobre y 7% a borato de sodio y zinc (Böthig et al., 2023).

2.2 OFERTA EN LA REGIÓN

Para Argentina, se cuenta con los datos reportados en el "Relevamiento de plantas impregnadoras 2022" realizado por la Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial (Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial, 2023). En 2022, existían 45 empresas en actividad y 3 sin actividad, con una capacidad instalada de 784.778 m³/año y una producción de 324.991 m³ ese año (aprox. 41,9% del uso de la capacidad instalada). De estas, el 94,8 % correspondió a postes y 5,2 % a madera aserrada (16.785 m³). El 100% de las plantas utilizaron el arseniato de cobre cromatado (CCA) y el 11,1% utilizó también creosota.

En Chile, de acuerdo con los datos reportados en el "Boletín Estadístico 195: la Industria del Aserío 2023", se impregnaron 231.000 m³ de tablas (menos de 3% de la madera aserrada total), de los cuales 196.128 m³ fue utilizada como madera estructural (Pino Radiata) (Pardo Velásquez et al., 2024). Se utiliza mayoritariamente CCA y cobre micronizado como preservantes, pero no se indica el volumen de cada uno. No se mencionan tampoco los datos de exportación de la madera estructural tratada. Respecto a los postes y polines, el informe "La Industria de Postes y Polines 2023" indica que en el año 2022, estuvieron en operación 85 plantas (93 % de las plantas existentes) y se produjeron 269.218 m³, valor que rompió la tendencia de crecimiento que venía desde el año 2010, con más de 350.000 m³ en 2021 (Soto Aguirre et al., 2023). La madera utilizada casi en su totalidad (aprox. 99%) para los postes y polines es el *Pinus Radiata*. El reporte no indica el agente impregnante, dándose entonces por descontado que utiliza exclusivamente CCA. A diferencia de la MAE, existe mercado exportador de postes y polines, en 2022, 14 empresas exportaron alrededor de 27.000 m³ (casi USD 11 millones).

La información sobre la situación en Brasil es muy dispersa y no se encontraron datos oficiales. De acuerdo a Lignum Latin-America, la producción de madera tratada en Brasil es de alrededor 4,0 millones m³, de donde un 20-25 % son para el sector de construcción, pero fundamentalmente para cercas y afines (Lignum Latin-America, n.d).

2.3 DEMANDA EN LA REGIÓN

A nivel regional, Brasil y Argentina son grandes consumidores de madera aserrada, pero ambos países muestran una baja dependencia de las importaciones. En Brasil, las importaciones representan apenas el 0,2% del consumo, mientras que, en Argentina, esta cifra es del 1,8%. Esto sugiere que, aunque el consumo de madera es considerable en estos mercados, las importaciones de madera tratada no representan una porción significativa de la demanda total. Por lo tanto, estos mercados no se perfilan como destinos viables para la exportación de madera térmicamente tratada en el corto plazo, dado que la producción interna cubre la mayor parte de sus necesidades.

2.4 PROYECCIÓN DE LA DEMANDA

La proyección de la demanda está íntimamente relacionada con la aplicación de políticas que limiten el uso de CCA, para su utilización solamente en Clase 3 sin protección superficial o Clase 4, o por el interés del consumidor de adquirir productos con menor impacto ambiental. En todos los casos es una demanda difícil de cuantificar a priori.

Analizando ahora las necesidades en soluciones habitacionales reportadas en el "Plan Quinquenal de Viviendas 2020-2024", se reporta que en el periodo 2015-2019 se construyeron 27.533 viviendas nuevas apoyadas por programas del DINAVI-MTOVMA (ejecutadas y en ejecución al momento de la aprobación del plan). Particularmente el 61 % de las viviendas construidas en cooperativas fueron de dos dormitorios, con una superficie entre 50 y 60 m², mientras que 31% fueron de 3 dormitorios, con una superficie entre 70 – 80 m². Se indica que a 2020 había un rezago de 57.000 soluciones habitacionales a ser atendido por el sector público. Se indica también que, a ese momento, "los hogares en situación de déficit habitacional cualitativo estimado fueron de 169.573 hogares, lo que representa un 21% del total de hogares particulares." Asimismo, se constata la existencia de 65.000 viviendas en asentamientos. El Plan Nacional de Viviendas 2020-2024 tuvo como meta, que al final del periodo se terminarán y estarán en ejecución 23.728 soluciones habitacionales (Dirección Nacional de Viviendas, 2020). No se tiene al momento información sobre el alcance del cumplimiento del Plan.

Este documento, el MVOT plantea también como objetivo "Promover el uso de la madera de origen nacional en soluciones constructivas tendientes a aumentar la oferta de vivienda pública, reduciendo los tiempos de ejecución y los costos de obra".

Considerando la información precedente, se plantea el escenario de construcción de 25.000 nuevas viviendas apoyadas por el Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial (MVOT), en el quinquenio, de los cuales un 30 % se construyen con madera. Esto indica la construcción promedio de 1650 casas de madera por año. Considerando la distribución de 60 % corresponden a viviendas de 2 dormitorios y 30 % de 3 dormitorios (de acuerdo a las estadísticas previas) y una superficie de 55 y 70 m² respectivamente y una relación de 0,13 m³/m² para viviendas de una planta (Böthig et al., 2023), se tiene un consumo de madera estructural de 11.850 m³ anuales.

Actualmente, se utiliza madera tratada en las viviendas en la solera basal y en los revestimientos exteriores, consumiéndose aproximadamente 2,5 m³ en una casa de dos dormitorios y 3,4 m³ en el caso de tres dormitorios. Sin embargo, si se considera que toda la madera estructural utilizada, debe ser madera preservada, los consumos aumentan a 7,1 y 9,1 m³ de madera por vivienda de dos o tres dormitorios respectivamente; lo que conduciría a un consumo de madera preservada de 11.850 m³ anuales utilizados para la construcción de viviendas sociales. A los efectos de este trabajo se considerará que toda la madera estructural debe ser preservada considerando las clases de uso manejadas en la Figura 12, tomada de "Wood Protection Association" (WPA, 2021)



Figura 12. Ejemplos e ilustración de las clases de uso 2, 3 y 4 para la construcción de viviendas según BS EN 335. Extraído de WPA, 2021

2.5 PRECIO

De acuerdo a conversaciones con proveedores, el precio de la madera preservada con cobre micronizado (MCA) es actualmente un 25 a 30 % superior a la madera tratada con CCA, siendo estos últimos alrededor de 500-700 USD/m³. Cabe señalar que actualmente se produce madera con MCA con una retención de 1 kg MCA/m³, sin embargo, a los efectos de este trabajo, se tomará una retención de 1 kg MCA/m³ y de 2,4 kg MCA/m³, para asegurar cumplimiento de madera para uso de Clase 3.

3 ESTUDIO TÉCNICO DE PREFACTIBILIDAD

3.1 TAMAÑO Y LOCALIZACIÓN

A los efectos de este estudio, se localizará el emprendimiento en zona cercana a los lugares de producción de madera aserrada. Para ello se podría considerar la

localización en los departamentos de Paysandú, Rivera o Tacuarembó en primera instancia, de acuerdo a la información del "Censo de Aserraderos 2019" (Boscana & Boragno, 2020).

De los comentarios precedentes, se resuelve evaluar tecno-económicamente, la instalación de un emprendimiento que produzca 4000 m³ anuales de madera tratada con MCA y con una proyección de 10.000 m³ al año 10 de funcionamiento. El aumento de la producción estará dado por la cantidad de jornales dedicados y para los años más avanzados del proyecto, el aumento de turnos de producción. Se considerará un 50 % de producción de madera para Clase 2 utilizando 1 kg MCA /m³ y un 50 % de producción de madera Clase 3 utilizando 2,4 kg MCA/m³ (Kirker & Lebow, 2021). Se evaluará la instalación del emprendimiento de esta planta en el Departamento de Rivera en la ciudad de Tranqueras particularmente, estando situado conexo a un aserradero.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO

El proceso productivo a desarrollar se encuentra descrito en detalle en el Capítulo 5 "Buenas Prácticas Operacionales" de la "Guía de Buenas Prácticas en Impregnación de Madera" Tomo 2: "Gestión Ambiental y Producción más Limpia" publicadas por el Proyecto Competitividad y Medio Ambiente. (Cooperación Técnica MERCOSUR (SGT6) - Alemania (GTZ), 2007). El cambio de preservante de CCA a MCA no implica cambios relevantes en el proceso productivo, aunque si implican cambios en el diseño del tanque de almacenamiento del preservante.

La Figura 13 muestra el diseño conceptual de la instalación (nuevamente el ejemplo está dado con CCA, pero la instalación de MCA es similar).

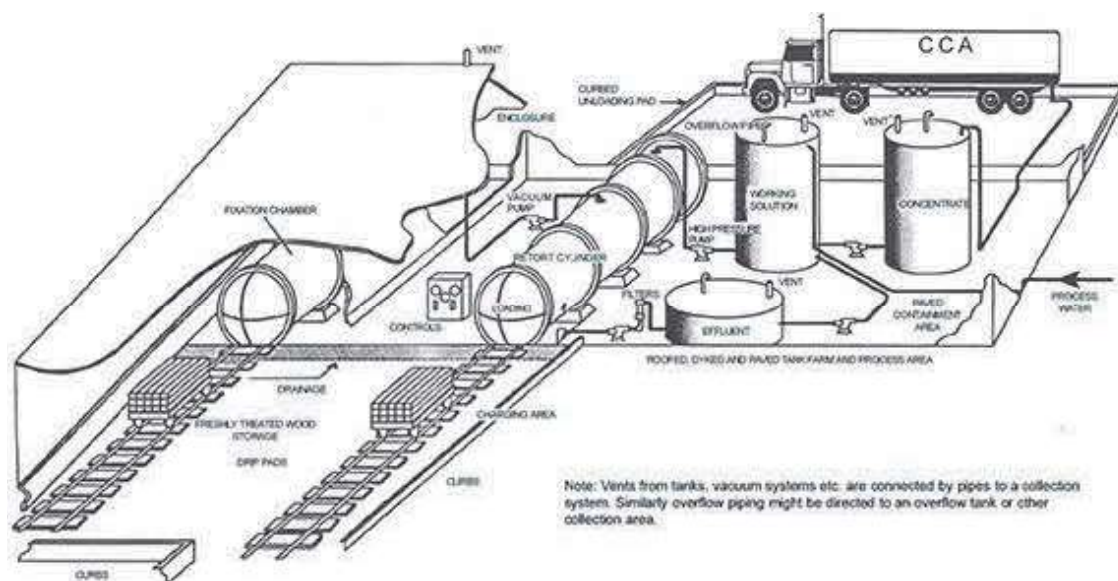


Figura 13. Esquema de instalación de impregnación de madera a presión. Extraída de "Environmental recommendations for wood preservation facilities" <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/management-toxic-substances/publications/environmental-r>

Las áreas más importantes a considerar son (Cooperación Técnica MERCOSUR (SGT6) - Alemania (GTZ), 2007):

1. Playa de madera sin tratar / tratada.
2. Depósito de tambores de preservante concentrado.
3. Área de preparación y almacenado de solución de trabajo (tanque de preparación, tanques de solución de trabajo y tanque de agua).
4. Área del autoclave (impregnador) y bombas de vacío, circulación y presión.
5. Sala de control.
6. Zona de carga/descarga del autoclave y patio de goteo.
7. Playa de curado.
8. Áreas de descanso y vestuario del personal.

El autoclave es el equipo principal de la instalación. Normalmente son diseñados entre 1.0 m y 4.5 m de diámetro interno, y de largo variable, normalmente entre 8 y 15 m. A los efectos de considerar los costos de la instalación se quiere mencionar que el autoclave debe contar con estructuras de contención para recuperar solución de preservante remanente. Particularmente debe estar instalado con una fosa de contención impermeabilizada y sellada bajo el autoclave, con capacidad para contener el 110 % del volumen de carga y con pendiente hacia el sumidero, el cual debe ser impermeabilizado y sellado dentro de la fosa para bombeo de líquido hacia el tanque de agua de proceso. La madera recientemente impregnada debe permanecer en la zona de salida del autoclave (Patio de Goteo), la que debe ser techada y asegurada de forma que la solución remanente que gotea en este espacio sea canalizada hacia las unidades de contención y recirculada hacia el tanque de almacenamiento de solución de impregnación. En caso de que el proceso de fijación se realice al aire, situación de la mayoría de las plantas de impregnación instaladas en el Uruguay, es necesario prever una superficie techada con capacidad para mantener la producción de 72 horas. (Cooperación Técnica MERCOSUR (SGT6) - Alemania (GTZ), 2007).

4 ESTUDIO ECONÓMICO Y FINANCIERO

4.1 INVERSIONES

Las inversiones iniciales estimadas se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Resumen de inversiones asociadas a la instalación de una planta impregnadora de madera con MCA, para una producción de 10.000 m³ anuales.

Concepto	USD
----------	-----

Inversiones amortizables tangibles (+ terreno)	300.000
Inversiones amortizables intangibles	155.000
Inversiones no amortizables	312.000
Total	767.000

Los conceptos incluyen los siguientes ítems:

- Inversiones amortizables tangibles: obras espaciales sobre terreno, obra civil, equipos, instalaciones de servicios, cañerías, equipos móviles, gastos menores. Se incluye el terreno en este ítem.
Dentro del equipo se destacan: autoclave impregnador con puerta con cierre a garras, bombas de vacío, presión y circulación, tableros, zorras para carga y transporte, tanque almacenamiento y tanque mezcla con construcción y equipamiento específico para mantener en suspensión el impregnante. La información y cotizaciones correspondientes al equipamiento principal fue aportada por la empresa Calinco S.A. (Argentina).
- Inversiones amortizables intangibles: estudios preliminares de ingeniería, supervisión instalación, puesta en marcha, puesta a punto, promoción, seguros.
- Inversiones no amortizables: inventarios en efectivo, materia prima, inventario de productos terminados y producto vendido a cobrar. Se asume un mes de salarios y 15 días de stock de materia prima y producto terminado.

4.2 VENTAS

El estudio prevé un volumen de ventas para el año 1 del proyecto de 4.000 m³ de madera aserrada tratada con MCA, de los que 2000 m³ tendrán una retención de 1 kg/m³ y 2000 m³ de 2,4 kg/m³. Al año 4, se prevé un aumento de la demanda a 6000 m³ de madera tratada, 8000 m³ al año 8 y 10.000 m³ al año 10, siempre con 50% de retención de 1 kg/m³ y 50% de retención de 2,4.

De acuerdo con información suministrada por proveedores, se establece el precio de venta de la madera aserrada tratada con MCA en USD 780 el m³ para el caso de retención de 1,0 kg/m³ y de USD 910 /m³ para el caso de retención de 2,4 kg/m³. Esto implica un ingreso por ventas para el año 1 de USD 3.380.000 y de USD 8.450.000 para el año 10.

4.3 COSTOS

4.3.1 COSTOS FIJOS

Los trabajadores asociados al emprendimiento en sus diferentes años se indican en la Tabla 21. En los costos fijos se considera el salario y aporte patronales de los trabajadores, el costo fijo de energía eléctrica, las amortizaciones, el mantenimiento del equipamiento y seguros.

Tabla 21. Personal contratado para el funcionamiento de la instalación.

Puesto	Cantidad (año 1)	Cantidad (año 10)
Gerente	1	1
Encargado de operaciones y compra/venta	1	2
Técnico electromecánico	1	2
Operario	1	4
Técnico prevencionista	1 (tercerizado)	1
Contabilidad	1 (tercerizado)	1

Sin contabilizar los costos fiscales, más del 80 % de los costos indicados corresponde a salarios.

De esta forma los costos fijos sin incluir pago de impuestos alcanzan a USD 174.143 para el año 1 y a USD 291.318 para el año 10 del emprendimiento.

Para el cálculo de costos fiscales se considera el Impuesto al Patrimonio (IP) e Impuesto a la Renta de las Actividades Económicas (IRAE), no se consideran exoneraciones del IRAE.

4.3.2 COSTOS VARIABLES

Dentro de los costos variables se considera la materia prima (tablas con humedad menor a 25%), transporte a la zona metropolitana donde será comercializado el producto terminado, el costo del impregnante (MCA) y servicios (energía eléctrica, agua, tratamiento de efluentes y residuos).

Los costos variables ascienden a USD 1.272.549 para el año 1 del emprendimiento y a USD 3.180.571 para el año 10.

4.3.3 COSTOS DE PRODUCCIÓN

Los costos de producción sin incluir impuestos alcanzan los USD 402/m³ para el año 1 y USD 387/m³ para el año 10 del proyecto. La distribución de los costos (año 1) se muestra en la Figura 14.

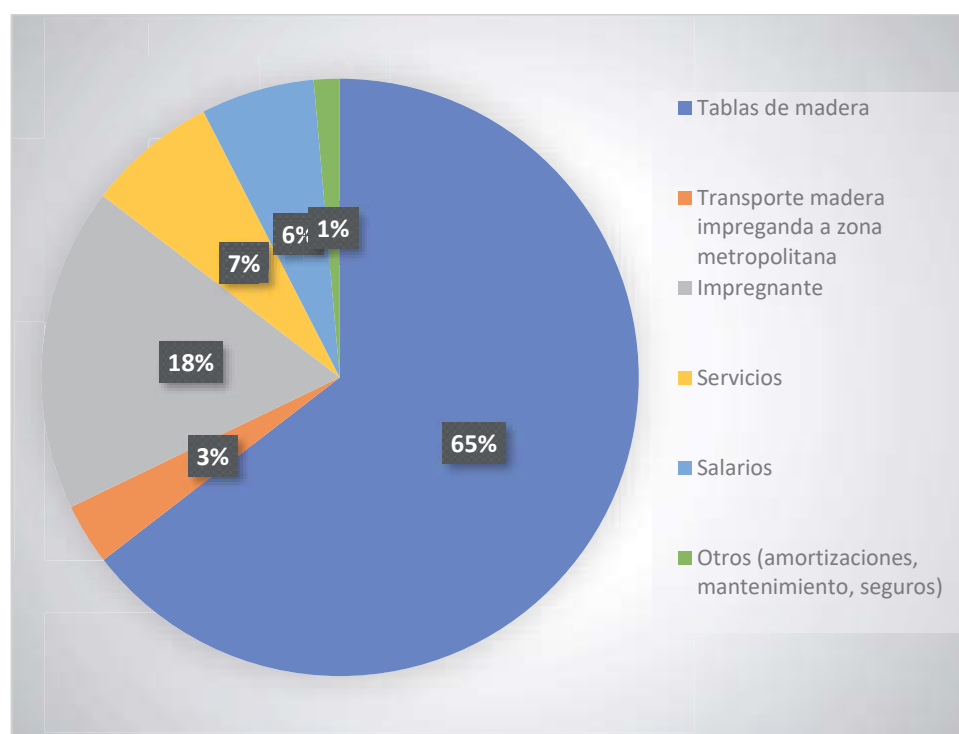


Figura 14. Distribución porcentual de los costos asociados a la producción de madera aserrada tratada con MCA (no se incluyen impuestos).

Es claro que el componente más importante del costo es el de compra de madera aserrada menor a 25 % de humedad; mientras que el costo del impregnante alcanza el 18 % de los costos.

4.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA Y FINANCIERA

Se realizan los cálculos económico financiero del proyecto considerando Capital Propio y considerando el pago de los impuestos mencionados previamente. Para el caso propuesto, la Tasa Interna de Retorno, TIR (%) del Proyecto superiores a 100% lo que lo hace un proyecto sumamente atractivo para el inversionista. Para el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) se fija la tasa de descuento (i) en un 10%. Los cálculos se realizan utilizando las aplicaciones económicas-financieras de Microsoft Excel.

El indicador de VAN de este proyecto es de USD 10.573.900 por lo que este proyecto es financieramente viable y atractivo. El período de repago es de 1 año.

Sin embargo, este cálculo tecno-económico se realiza considerando que el público está dispuesto a pagar entre un 25 a 30 % más por la madera tratada con MCA, frente a la opción de compra de madera tratada con CCA, y que existe mercado para la venta de 4.000 m³ al año 1 del proyecto, incrementándose paulatinamente hasta tener mercado para colocar 10.000 m³ en el año 10 de proyecto. El punto de equilibrio en este caso es de 352 m³ anuales. Mientras no existan limitantes legales al uso de CCA como preservantes, este escenario es poco probable, ya que la mayor parte de los consumidores no se verán atraídos a consumir un producto más costoso y del cuál conocen menos sus prestaciones.

Analizando un incremento de los costos variables en 15% y dejando el precio de venta inicialmente considerado, el proyecto continúa siendo muy atractivo económica y financieramente. Presenta una TIR (%) mayor a 100 % y el VAN en este caso es de USD 9.474.900.

Si se considera el precio de venta del producto del orden de 25 % inferior al considerado en el caso base, es decir, que se encuentre en el entorno del precio de venta de la madera aserrada impregnada con CCA, para las operaciones indicadas en el caso base de 4000 m³ de madera al año 1 y 10.000 m³ de madera impregnada al año 10, el proyecto continúa siendo muy atractivo económica y financieramente, pero el punto de equilibrio ahora se encuentra en 582 m³ anuales. La competencia por el CCA en este escenario no es de costos, pero hasta que el MCA sea un preservante ampliamente conocido, es factible que no sea tan atractivo para los consumidores como es el CCA en el mercado uruguayo.

Por otro lado, si se realiza un estudio de sensibilidad, considerando como variable el costo del impregnante, duplicando el costo de impregnante, la utilidad neta se hace cero (considerando el caso base de 2000 m³ impregnados con una retención de 1 kg/m³ y 2000 m³ impregnados con una retención de 2,4 kg/m³).

De esta forma se entiende que el punto clave en este estudio es la colocación de la madera impregnada con MCA. Asegurando la venta del producto, el análisis económico-financiero demuestra que el proyecto es factible de ser llevado a cabo, con puntos de equilibrio en la producción relativamente bajos 350 o 580 m³ anuales, dependiendo del precio de venta del producto.

5 CONCLUSIONES

Una planta impregnadora de 10.000 m³ anuales al año 10 del proyecto, requiere de una inversión de alrededor USD 770.000 y presenta costos de producción (sin impuestos) de USD 402/m³ para el año 1 y USD 387/m³ para el año 10 del proyecto. En base a los valores utilizados en este análisis, la madera es el principal componente del costo (65%), mientras que el preservante, corresponde al 18% del costo de producción.

La instalación de una planta impregnadora que utilice MCA como preservante es viable económica y financieramente atractiva para un inversor, si se asegura la colocación del producto en el mercado nacional.

Sin embargo, se entiende que mientras no existan limitantes legales al uso de CCA como preservante, la colocación del producto de forma masiva es poco probable, ya que la mayor parte de los consumidores no se verán atraídos a consumir un producto más costoso y menos conocido que el CCA.

6 BIBLIOGRAFÍA

Böthig S., Fontana J.J., Franco J., Godoy D., Moya L., 2023, "Lineamientos de diseño estructural para viviendas de entramado ligero construidas con maderas de pino y eucalipto de Uruguay. Soluciones estandarizadas basadas en normas nacionales y en el criterio del Eurocódigo 5", *IICA*, 176p. ISBN 978-92-9273-057-4, Uruguay.

Boscana, Mariana, and Leonardo Boragno. 2020. "Encuesta de Aserraderos 2020 Informe Final, Agosto 2020." *División Evaluación e Información, Dirección General Forestal, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca* Montevideo, Uruguay. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-09/INFORME%20FINAL.pdf>. Acceso 12 jul 2024.

Cooperación Técnica MERCOSUR (SGT6) - Alemania (GTZ), 2007, "Capítulo 5: Buenas Prácticas Operacionales" en "Guía de Buenas Prácticas en Impregnación de Madera" Tomo 2: "Gestión Ambiental y Producción más Limpia", Uruguay. https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/2020-07/AdjuntoI2-ZcopiaZ15_0.pdf. Acceso 04 abr 2024.

Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial, Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca - Ministerio de Economía, 2022, "Relevamiento de plantas impregnadoras 2022", Argentina, https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/desarrollo-foresto-industrial/foresto-industria/archivos/000001-Informes%20Anuales%20de%20la%20Industria/000003_2022/231207_Rel evamiento%20de%20Plantas%20Impregnadoras%202022.pdf. Acceso 14 oct 2024.

Dirección Nacional de Viviendas, MVOT, 2020 "Plan quinquenal de viviendas", <https://www.gub.uy/ministerio-vivienda-ordenamiento-territorial/sites/ministerio-vivienda-ordenamiento-territorial/files/documentos/publicaciones/Plan%20Quinquenal%20de%20Vivienda%202020%20-%202024.pdf>. Acceso 14 oct 2024.

Kirker, G.T.; Lebow, S.T., 2021. "Chapter 15: Wood preservatives." In: Wood handbook—wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-282. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 26 pp., USA.

Lignum, "Mercado brasileiro de madeira tratada", <https://lignumlatinamerica.com/mercado-brasileiro-de-madeira-tratada/>. Acceso 14 oct 2024.

Pardo Velásquez E., Troncoso Recabarren H., Poblete Hernández P., 2024 "Boletín Estadístico 195: la Industria del Aserrío 2023", *Instituto Forestal*, p 128. ISSN N° 0719 - 7741. Versión Digital, Chile.

Soto Aguirre D., Kahler González C., Pardo Velásquez E., Bañados Munita J.C., 2023, "La Industria de Postes y Polines. Boletín Estadístico N°194" *Instituto Forestal*, p. 34. Chile.

Wood Protection Association, 2021, "Code of Practice: Industrial Wood Preservation", 2nd Ed., *The Wood Protection Association*, United Kingdom.

ANEXO 2. ESTUDIO TECNOECONÓMICO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE LA MADERA

1 INTRODUCCIÓN

El tratamiento térmico de la madera es uno de los procesos más avanzados y comercialmente relevantes en la modificación de este material, proporcionando soluciones efectivas para mejorar su durabilidad y propiedades físicas sin el uso de productos químicos. Históricamente, técnicas de modificación térmica han sido empleadas desde hace más de un siglo, pero en las últimas décadas se ha registrado un crecimiento significativo tanto en la producción como en la innovación de esta tecnología. En este contexto, el método ThermoWood se ha destacado como uno de los tratamientos térmicos más empleados en Europa y ha comenzado a ganar aceptación en mercados emergentes, como el de Uruguay. Ante este panorama, nuestro estudio se fundamentará en el análisis de la tecnología ThermoWood, que representa una opción viable y rentable para la producción de madera tratada térmicamente en Uruguay. Además, se destaca que ya existe actualmente una empresa en Uruguay que produce con esta tecnología.

Para el estudio técnico-económico de prefactibilidad de una planta de modificación térmica de madera nacional se toma como referencia el estudio realizado por Barragán et al. (2016), habiéndose actualizado por precios y valores a 2023, para la presupuestación y el análisis de costos.

2 ESTUDIO PRELIMINAR DE MERCADO

2.1 DEMANDA EN URUGUAY

En Uruguay, el uso de la madera como material de construcción ha crecido de manera sostenida, impulsando el consumo de madera tratada, especialmente con CCA, debido a la ausencia de regulaciones específicas que limiten este tratamiento. El mercado uruguayo consume aproximadamente 40.000 m³ de madera tratada con CCA por año, abarcando productos como postes, tablas y tirantes. Sin embargo, no existe una oferta significativa de madera modificada térmicamente en el país, en parte debido a la diferencia de precios frente al CCA. A pesar de esto, una empresa que introduzca madera térmicamente modificada podría captar la atención de consumidores con mayor poder adquisitivo, quienes buscan productos ecológicos y seguros para la salud, generando una oportunidad para un nuevo segmento de mercado.

2.2 DEMANDA EN LA REGIÓN

A nivel regional, Brasil y Argentina son grandes consumidores de madera aserrada, pero ambos países muestran una baja dependencia de las importaciones. En Brasil, las importaciones representan apenas el 0,2% del consumo, mientras que en Argentina, esta cifra es del 1,8%. Esto sugiere que, aunque el consumo de madera es considerable en estos mercados, las importaciones de madera tratada no representan una porción significativa de la demanda total. Por lo tanto, estos mercados no se perfilan como destinos viables para la exportación de madera térmicamente tratada en el corto plazo, dado que la producción interna cubre la mayor parte de sus necesidades.

2.3 PROYECCIÓN DE LA DEMANDA

El mercado global de madera térmicamente modificada ha mostrado un crecimiento continuo en los últimos años. Según los datos de ThermoWood, las ventas pasaron de 18.799 m³ en 2001 a 145.733 m³ en 2014, con variaciones anuales significativas en el porcentaje de crecimiento. Utilizando regresiones lineales para proyectar las ventas futuras, se espera que la demanda de madera térmicamente modificada continúe en aumento, alcanzando 278.401 m³ para 2028, lo que representa un crecimiento anual promedio del 3,7% al 6,8%. Esto refleja una tendencia favorable hacia la adopción de tecnologías de tratamiento de madera más sostenibles, impulsada por la creciente preferencia de productos «verdes» y regulaciones más estrictas sobre el uso de productos tratados con químicos, especialmente en mercados desarrollados como EE. UU., Unión Europea y Japón.

2.4 OFERTA EN URUGUAY

En Uruguay, la oferta de madera tratada térmicamente es incipiente. Se están dando los primeros pasos, tanto en importación de producto como en producción nacional. La empresa Maderera Piedras del Toro inició su proyecto de modificación térmica de madera en 2020, con la primera producción llevada a cabo en 2021. Las especies de madera tratadas incluyen pino y eucalipto. El proceso de tratamiento térmico que utilizan se basa en la modificación térmica con vapor, aplicando 210°C durante 3 horas para pino y 190°C por 3 horas para eucalipto. La duración total del proceso es de aproximadamente 3 días. La inversión total de la planta fue de 1,5 millones de USD, incluidos costos por obra civil, la cámara de tratamiento, la caldera, y máquinas de cepillado y moldeado. Tienen una capacidad de producción de alrededor de los 2.000 m³ por año. A través de la presentación del proyecto ante la COMAP²⁶, obtuvieron beneficios tributarios que incentivar la inversión. Los productos comercializados son

²⁶ Comisión de Aplicación de la Ley de Inversiones

tablas para pisos, decks y revestimientos, aptos para uso interior y exterior. Los productos tratados logran clasificaciones de durabilidad según la norma europea: clase II (20 años) para pino y clase I (30 años) para eucalipto. De momento, comercializan directamente con los clientes.

Por otra parte, existen algunas barracas que comercializan maderas tratadas de origen importado. La empresa Barraca Paraná ofrece la línea Lunawood Thermowood²⁷, en una variada gama de productos terminados, a precios superiores a los 3.000 USD/m³. Otra empresa que comercializa una variante de madera termotratada es Maguinor Maderas, en este caso madera de abeto de la marca Thermory²⁸.

2.5 OFERTA EN LA REGIÓN

En América Latina, Brasil lidera la producción de madera térmicamente modificada, con dos empresas que alcanzan una producción conjunta de aproximadamente 3.000 m³ anuales. Sin embargo, la oferta sigue siendo limitada en comparación con otras regiones del mundo. Chile y Argentina aún no muestran un desarrollo significativo en esta tecnología, aunque existe un creciente interés en introducirla, especialmente por la disponibilidad de recursos madereros adecuados para la modificación térmica. Otros países como México y Colombia también están explorando su implementación, pero las cantidades producidas aún son marginales.

2.6 OFERTA MUNDIAL

A nivel global, Europa es el principal productor de madera tratada térmicamente, con un crecimiento destacado en la última década. La producción de madera térmicamente modificada (MTM) se ha triplicado, pasando de 200.000 m³ en 2017 a 700.000 m³ en 2021, con ThermoWood como el proceso más utilizado. Este proceso representa aproximadamente un tercio de la producción europea. China ocupa el segundo lugar en producción, superando los 200.000 m³ anuales, enfocándose en tratamientos moderados. En Estados Unidos, la producción de MTM es más limitada, con un volumen anual estimado de 100.000 m³, pese al tamaño de su mercado de madera. En Canadá, se producen aproximadamente 30.000 m³ anuales, principalmente mediante el proceso ThermoWood. Otras regiones, como Australia y Sudáfrica, dependen principalmente de las importaciones para satisfacer la demanda de MTM, mientras que Nueva Zelanda cuenta con pequeñas plantas de producción, principalmente de pino radiata, pero en volúmenes poco significativos.

²⁷ <https://www.barracaparana.com/maderas/materiales-de-carpinteria/lunawood/>

²⁸ <https://maguinormaderas.com.uy/thermory-ignite-abeto/>

2.7 PRECIO

El precio de la madera térmicamente tratada varía según el tipo de madera y la región. En términos globales, la madera tratada térmicamente ha visto un aumento moderado en sus precios debido a su creciente demanda. Se destaca que el proceso de ThermoWood, popular en Europa, mantiene precios competitivos en el mercado internacional. Los precios por metro cúbico de madera tratada térmicamente se sitúan actualmente entre **850 y 1.500 USD/m³**, dependiendo de las terminaciones y el grado de durabilidad. Los factores que influyen en estos precios incluyen no solo los costos de producción, sino también las fluctuaciones en la oferta de materias primas, la demanda de productos sostenibles y los costos de transporte internacional.

En el caso de América Latina, donde las producciones locales son limitadas, los costos pueden elevarse debido a la necesidad de importar tecnología o productos ya procesados. En Uruguay, el precio de la madera tratada térmicamente podría estar en un rango de **US\$ 900 a 1.300/m³**, debido a los costos de transporte y las economías de escala más reducidas en comparación con mercados más grandes como Estados Unidos o Europa²⁹.

Si actualizamos la proyección anterior, tomando en cuenta estos factores, podríamos suponer que el precio de venta al cliente final para un proyecto en Uruguay se establecería alrededor de **1.100 USD/m³**, incluyendo los costos logísticos y de exportación. Este precio lo haría competitivo frente a otras ofertas del mercado global, al mismo tiempo que reflejaría los aumentos en los costos de producción y transporte en la última década.

El costo de la madera tratada con CCA varía significativamente según el tipo de madera y la región. En general, el precio de la madera tratada con CCA oscila entre **250 y 800 USD/m³**. Por ejemplo, en México, la madera de pino tratada con CCA puede costar entre **250 y 350 USD/m³**, dependiendo de las dimensiones y el proveedor. En los Estados Unidos, los precios pueden llegar a **500 USD/m³**. En Uruguay, el precio de la madera tratada con CCA varía dependiendo de la especie, el tamaño y el proveedor. Los precios observados en el mercado indican que la madera tratada con CCA puede costar entre **\$500 y \$700 USD/m³** al consumidor final.

3 ESTUDIO TÉCNICO DE PREFACTIBILIDAD

3.1 TAMAÑO Y LOCALIZACIÓN

Existe en el país una importante producción de madera aserrada necesaria para un proyecto de modificación térmica de madera. Debido a esto, la disponibilidad de

²⁹ [Industria maderera uruguayareflota.concuatro.proyectos.de.inversion|AmericaEconomia\(americaeconomia.com\)](http://industria.maderera.uruguayareflota.concuatro.proyectos.de.inversion|AmericaEconomia(americaeconomia.com))

materia prima no sería una limitante para el tamaño del proyecto. En el mundo, fundamentalmente en Europa, se encuentran instaladas plantas de modificación térmica con capacidades de producción que varían entre 1.000 y 30.000 m³/año (Sandberg 2015). De acuerdo a estudios realizados por Barragán et al. (2016), para el mercado uruguayo, las escalas mínimas adecuadas serían entre 2.000 y 5.000 m³/año.

En el presente estudio se analizarán dos opciones de proyecto. En primer lugar, un proyecto independiente, en el cual se adquiere tablas verdes (sin secar), se realiza el secado y la modificación térmica. En este caso las opciones para la instalación del emprendimiento, de forma de disminuir los costos de transporte, serían dos:

- 1) Localización cercana a la provisión de materia prima, donde existen aserraderos instalados: Paysandú, Rivera, Tacuarembó, Cerro Largo, Treinta y Tres.
- 2) Localización cercana a los centros de consumo más importantes: Montevideo, Canelones y Maldonado.

La segunda alternativa del proyecto es la de incorporar el proceso de modificación térmica dentro de un aserradero que ya se encuentre operando. Esta opción tiene una serie de ventajas que se traducen en una menor inversión, y una producción con menores costos producto de la escala y los procesos preexistentes.

A continuación, se describe y se realiza en análisis técnico-económico de una planta independiente instalada en la localidad de Piedras Coloradas, Paysandú, con una capacidad de producción inicial de 5.000 m³ de madera térmicamente modificada y una proyección de 10.000 m³ al año 10. Como alternativa, se describe la opción de la planta de modificación térmica instalada como parte de los procesos productivos de un aserradero, localizado también en Piedras Coloradas.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO

El proceso comienza con la compra de tablas verdes para la obtención de madera seca de alta calidad en secadores industriales. Esto es posible debido a que la localización sería próxima a un aserradero, lo que viabiliza el transporte de tablas con alto contenido de humedad. La decisión de invertir en secadores de madera para adquirir tablas verdes (más económicas), reducen el costo de la materia prima a expensas de una mayor inversión inicial y mayores costos energéticos. De esta forma, se genera como subproducto tablas secas, ya que solo las tablas secas de mayor calidad serán seleccionadas para ser tratadas. Al disponer de una etapa de alto consumo térmico como el secado, y teniendo los equipos de modificación térmica con la variabilidad de consumo térmico inherente del proceso de tratamiento, se tendrá un consumo base y constante de energía térmica con los secadores. Esto facilitaría el diseño, operación y eficiencia de la caldera. La caldera es un aspecto muy relevante, ya que determina en buena medida los costos operativos. La ventaja de estar próximos a aserraderos es que se puede adquirir biomasa como combustible, lo que se presenta como una opción menos costosa que utilizar gas licuado de petróleo o gas natural. Las altas temperaturas necesarias durante el proceso de modificación térmica implican que la caldera debe ser de fluido térmico y no de vapor, ya que para este último se

requerirían altas presiones y equipos demasiado grandes, incompatibles con las necesidades térmicas.

Luego de la etapa de secado, las tablas deben ser clasificadas para evaluar la aptitud para la modificación térmica. Para ello se prevé la instalación opcional de un escáner automático, el que podría ser sustituido por clasificación visual por parte de los operarios, ahorrándose la inversión en uno de los equipos más costosos de la planta. Las tablas defectuosas son utilizadas como combustible en la caldera, mientras que las que no alcancen la calidad suficiente para la modificación serán cepilladas y comercializadas como tablas secas.

La siguiente etapa del proceso es la modificación térmica de las tablas. En líneas generales, esta etapa tiene una duración de 24 horas, con temperaturas máximas que varían según el producto a obtener y la especie a tratar, y que promedian 200°C. Una vez culminado el proceso, las tablas serán nuevamente clasificadas para descartar las que presente defectos. Seguidamente, pasarán por el equipo de cepillado y moldeado para darle su forma final dependiendo del tipo de producto.

3.3 ETAPAS Y EQUIPOS

El equipamiento principal para realizar el proceso es la cámara de tratamiento. A escala comercial es posible encontrar cámaras rectangulares, muy similares a cámaras de secado convencionales, así como reactores cilíndricos del estilo de los empleados en impregnaciones químicas (Figura 15). Las cámaras rectangulares son variantes de las cámaras de secado, para las que se utilizan materiales resistentes a las elevadas temperaturas. En el caso de los reactores cilíndricos, estos son más frecuentes cuando se emplean tratamiento a presión o con aceite.



Figura 15. Fotografía de una cámara de tratamiento térmico ³⁰.

³⁰ <https://resawntimberco.com/>

Se requiere que los materiales empleados en la construcción del equipo sean resistentes al ambiente corrosivo que se genera durante el proceso. Las altas temperaturas, el elevado contenido de humedad, y los compuestos volatilizados que se generan debido a las reacciones químicas, generan el ambiente corrosivo.

A nivel comercial existen diversos proveedores de equipamientos para realizar la modificación térmica. Algunos proveedores diseñan equipos específicos, otros adaptan las cámaras de secado de madera tradicionales para soportar las altas temperaturas y las condiciones de la modificación térmica. Este es el caso de la compañía alemana Mahild, especializada en equipos de secado de madera y que han incorporado cámaras de modificación térmica. Esta empresa ofrece cámaras de modificación térmica que van desde los 30 m³ de capacidad hasta arriba de 100. La empresa uruguaya que realiza TMT, por ejemplo, dispone de una cámara Mahild de 30 m³.

Otro proveedor de equipos para la producción de TMT es la empresa danesa WTT (Wood Treatment Technology), la cual desarrolló el método de tratamiento a presiones elevadas. En este caso, debido a que el equipo debe soportar presiones de hasta 20 bar, las cámaras de tratamiento son pequeñas y cilíndricas. La alta presión permite reducir el tiempo de tratamiento, lo que permite producir hasta 2 batch por día, y compensar el tamaño de los equipos y su efecto en la productividad. La capacidad puede variar entre 3 a 10 m³

A escala industrial existen al menos 3 fuentes de energía térmica para el proceso. Para escalas pequeñas es posible encontrar reactores calefaccionados mediante energía eléctrica. Cuando las escalas son mayores, es más económico utilizar vapor o fluido térmico. Este último se usa con frecuencia, ya que las elevadas temperaturas necesarias en el proceso requerirían tener vapor a elevada presión que supera las disponibles en aserraderos convencionales (Barragán et al.). 2016). El combustible empleado en las calderas no requiere de especificaciones especiales, aunque resulta recomendable emplear calderas de biomasa en las que se puede utilizar como combustible la madera defectuosa generada en el proceso, que puede alcanzar cantidades significativas (5 a 10%).

4 ESTUDIO ECONÓMICO Y FINANCIERO

4.1 INVERSIONES

Las inversiones iniciales estimadas para cada alternativa del proyecto se presentan en la tabla a continuación:

Concepto	Alternativa independiente	Alternativa en aserradero
Inversiones amortizables tangibles	13.644.784	3.205.511
Inversiones amortizables intangibles	3.729.359	1.160.552
Inversiones no amortizables	4.214.031	2.605.055
Total	21.588.174	6.971.119

Los conceptos incluyen los siguientes ítems:

- Inversiones amortizables tangibles: obras espaciales sobre terreno, obra civil, equipos, servicios, cañerías, equipos móviles, gastos menores.
- Inversiones amortizables intangibles: estudios preliminares de ingeniería, supervisión instalación, puesta en marcha, puesta a punto, promoción, seguros.
- Inversiones no amortizables: inventarios en efectivo, materia prima, productos terminados y producto vendido a cobrar

Para el caso de alternativa independiente, se plantea una reinversión en el año 5, para alcanzar una producción de 10.000 m³ anuales de madera modificada. Esta reinversión, principalmente en mayor capacidad de secado y de tratamiento, es del entorno de los 5 millones de dólares.

5 EVALUACIÓN

5.1 VENTAS

El estudio prevé un volumen de ventas inicial de 5.000 m³ de productos madera térmicamente modificada, y además una cantidad aproximada de 6.500 m³ de tablas secas de menor calidad para el caso de la planta independiente. Al año 5 se alcanzarían ventas de 7.000 m³ de madera tratada, y para el año 10 el objetivo sería de 10.000 m³. En todos los escenarios, se contempla ventas al mercado doméstico y exportaciones. El precio de venta asumido es de 870 USD/m³, para aproximarse lo más posible al precio de las tablas impregnadas con CCA en Uruguay.

5.2 COSTOS

5.2.1 Alternativa independiente

El costo de producción estimado para la alternativa de la planta independiente es de 580 USD/m³ de tablas modificadas térmicamente, incluyendo el proceso de secado de

tablas. Los principales componentes son los sueldos del personal (30%) y la adquisición de tablas verdes de alta calidad (23%) (Figura 16).



Figura 16. Distribución porcentual de los costos asociados a la producción de madera termotratada en una planta independiente.

El combustible de la caldera presenta un bajo impacto en los costos cuando se utiliza biomasa (residuo de aserradero). Cuando se utiliza otro combustible, como gas licuado de petróleo (GLP) o gas natural, los costos aumentan considerablemente e inviabilizando el emprendimiento

5.2.1 Alternativa en aserradero

En este caso, en el análisis de costos solo toma en consideración la etapa de la modificación térmica. El costo de tratamiento es de 170 USD/m³ de MTT sobre el costo de las tablas secas, cuando el combustible utilizado es biomasa. Utilizar como alternativa GLP como combustible resulta en costos de tratamiento de 330 USD/m³ sobre las tablas secas.

5.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA Y FINANCIERA

5.3.1 ALTERNATIVA INDEPENDIENTE

El proyecto de planta independiente logra la viabilidad económica - ventas superiores a los costos - para una producción del entorno de 5.300 m³/año. En el caso de la evaluación financiera, se determina la tasa interna de retorno (T.I.R.) para el año 5 (previo a una reinversión) y para el año 10:

Año	TIR
5	5 %
10	7 %

La alternativa independiente no resulta de gran atractivo desde el punto de vista financiero. Sin embargo, se debe remarcar que el estudio no incluye beneficios fiscales que podrían aplicarse en este tipo de emprendimiento (COMAP, IRAE, Patrimonio, IVA exportación), mediante el cual, al ser capital intensivo, el rendimiento económico y financiero podría mejorar sustancialmente.

5.3.2 ALTERNATIVA EN ASERRADERO

Instalar equipos de modificación térmica en un aserradero preexistente resulta en 2.000 m³/año la producción mínima necesaria para igualar ventas y costos, debido al menor peso de las amortizaciones en los costos fijos. En este caso, la tasa interna de retorno resulta:

Año	TIR
5	16 %
10	19 %

Tal como se aprecia, el proyecto resulta un mayor atractivo económico y financiero cuando la modificación térmica se agrega a un proceso de aserradero que se encuentre en funcionamiento previo. En este punto cabe la misma aclaración que la otra alternativa: no se consideran en el análisis los beneficios fiscales posibles de aplicación.

6 CONCLUSIONES

Los emprendimientos de modificación térmica presentados en este análisis técnico-económico dependen fuertemente del costo de la materia prima y presentan elevados costos fijos, debido a la amortización de las inversiones en capital necesaria para llevarlos a cabo. De esta forma, si bien tanto la alternativa independiente como la instalada en un aserradero preexistente son viables económica y financieramente, la opción más atractiva para un inversor es la segunda. Un aserradero que ya dispone de los equipos de secado, clasificación, moldeado, transporte, generación de energía térmica y personal calificado supone una ventaja ya que implica menos inversiones iniciales. De todas formas, bajo cualquiera de los escenarios alternativos, la obtención de beneficios fiscales por los regímenes de promoción de inversiones existentes en Uruguay mejoraría sustancialmente la rentabilidad del emprendimiento.