

# Wood preservatives and microbial exudates with antagonistic activity against biological agents

## Preservadores maderables y exudados microbianos con actividad antagonista contra agentes biológicos deletéreos

**Vanessa Ruby García-Ortiz, Gabriela Benítez-Rocha**, \*Conservación y Manejo de Recursos Forestales, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo., General Francisco J. Mugica S/N, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México; **Mauro Martínez-Pacheco**, Instituto de Investigaciones Químico Biológicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo., General Francisco J. Mugica S/N, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México; **Crisanto Velázquez-Becerra** \*. \*Autor para correspondencia: [cvelazquez@umich.mx](mailto:cvelazquez@umich.mx).

**Recibido:** 20 de Abril, 2017.

**Aceptado:** 30 de Septiembre, 2017.

García-Ortiz VR, Benítez-Rocha G, Martínez-Pacheco M, Velázquez-Becerra C. 2017. Wood preservatives and microbial exudates with antagonistic activity against biological agents. *Revista Mexicana de Fitopatología* 36(1) 56-78.

**DOI:** 10.18781/R.MEX.FIT.1704-2

Primera publicación DOI: 10 de Noviembre, 2017.

First DOI publication: November 10, 2017.

**Resumen.** La madera de baja durabilidad es susceptible de deterioro por xilófagos y su protección es una meta tecnológica no alcanzada que genera pérdidas económicas y materiales. Alternativas para evitar el uso de preservadores convencionales tóxicos y contaminantes se pueden establecer mediante el conocimiento del microecosistema bacteriano en la madera. La protección de este material es posible obtenerla con bacterias y sus exudados.

**Abstract.** Wood of low durability is susceptible of deterioration by xylophages and its protection is a technological goal not reached that generates economic and material losses. Alternatives to avoid the use of toxic preservative conventional and contaminating can be established by knowledge of the bacterial microecosystem in the wood. The protection of this material is possible to obtain it with bacteria and its exudates. The purpose of this research is to highlight that the biodeterioration of low durability wood is avoidable by means of microbiological strategies relevant for the control of xylophages' fungi. The observation is that bacteria of the genera *Arthrobacter*, *Bacillus* and *Pseudomonas* and their exudates are potentially protective agents that exhibit different mechanisms of action such as antagonism, parasitism and the production of exudates containing molecules with effect: antimicrobial, chelator (siderophores) that inhibit enzymes or functions and volatile

El propósito de esta investigación es destacar que el biodeterioro de la madera de baja durabilidad es evitable mediante estrategias microbiológicas relevantes para el control de los hongos xilófagos. La observación es que bacterias de los géneros *Arthrobacter*, *Bacillus* y *Pseudomonas* y sus exudados potencialmente son agentes de protección que exhiben mecanismos de acción diferentes como, el antagonismo, el parasitismo y la producción de exudados que contienen moléculas con efecto: antimicrobiano (antibióticos), quelante (sideróforos) que inhiben enzimas o funciones y compuestos volátiles (dimetilhexadecilamina). El conocimiento de este ecosistema microbiano facilitará la construcción de una alternativa al uso de los preservadores convencionales de madera y constituye un área de oportunidad. Se evidencia la ausencia del conocimiento de bacterias antagonicas de los xilófagos, el manejo de la producción y composición de sus exudados y su aplicación, con lo que se manifiesta un campo inexplorado en la biotecnología de la preservación de la madera.

**Palabras clave:** xilófagos, lignocelulósico, madera, preservación, durabilidad.

## INTRODUCCIÓN

Por la composición orgánica de la madera es susceptible al deterioro biológico. En general, está constituida por celulosa 40-61%, hemicelulosa 15-30% y lignina 17-35%, particularidad que la hace una excelente fuente de carbono para sostener el ciclo de vida de algunos organismos. La madera en uso está expuesta a organismos tales como, bacterias, algas, hongos e insectos, que al nutrirse de sus macromoléculas provocan su degradación y con ello disminuyen sus atributos físico-mecánicos y prestaciones (Ibáñez, 2012). En la diversidad

compounds (dimethylhexadecylamine). Knowledge of this microbial ecosystem will facilitate the construction of an alternative to the use of conventional wood preservatives and constitutes an area of opportunity. It is evident the absence of knowledge of antagonistic bacteria of the xylophages, the management of the production and composition of their exudates and their application, thus manifesting an unexplored field in the biotechnology of the preservation of wood.

**Key words:** xylophages' fungi, lignin, wood, preservation, durability.

## INTRODUCTION

Due to its organic composition, wood is vulnerable to biological degradation. In general, it is composed of cellulose in 40-61%, hemicellulose 15-30%, and lignin 17-35%, making it an excellent source of carbon to sustain the life cycles of some organisms. Wood in use is exposed to organisms such as bacteria, algae, fungi, and insects, which feed off their macromolecules, causing their degradation, and therefore, their physical and mechanical attributes, as well as their performance (Ibáñez, 2012). In the bacterial diversity there is a great number of genera with species capable of deteriorating wood by degrading lignin and modifying their structure, such as *Flavobacterium*, *Xanthomonas*, *Aeromonas*, and *Nocardia* (Singh *et al.*, 2016). Also, aerobic species of the genera of *Pseudomonas* or *Achromobacter* also degrade structural polymers, which weaken the primary and secondary cell wall, with the alteration of the crystalline structure of these polymers and exposes them to promote the development of other deteriorator organisms (Zanni, 2004). Xylophagous algae are represented mainly by

bacteriana se encuentra un gran número de géneros cuyas especies son capaces de deteriorar la madera al degradar la lignina y modificar su estructura, tales como; *Flavobacterium*, *Xanthomonas*, *Aeromonas* y *Nocardia* (Singh *et al.*, 2016). También, especies aeróbicas de los géneros de *Pseudomonas* y *Achromobacter* igualmente degradan polímeros estructurales, que debilitan la pared celular primaria y secundaria, con la alteración de la estructura cristalina de estos polímeros y los expone para favorecer el desarrollo de otros organismos deterioradores (Zanni, 2004). Las algas xilófagas, están representadas principalmente por especies de los géneros *Clorophyta*, *Chrysophyta* y *Cianophyta* que al deteriorar la madera le provocan un cambio de color, un incremento en la absorción de radiación solar y agua. Sin embargo, el deterioro que realizan las bacterias y algas es menor que el daño producido por hongos e insectos xilófagos, estos últimos representan los principales agentes causantes del biodeterioro (Flower and Gonzalez-Meler, 2015).

En la industria de la construcción y productos basados en madera, los hongos xilófagos son responsables de grandes pérdidas económicas (Arbelo y Garbuyo, 2012). Organismos “cromógenos” se encuentran en este grupo que, al penetrar el tejido leñoso mediante las hifas, alcanzan las cavidades celulares, una acción que tiene como resultado un cambio de color (Moglia *et al.*, 2015). Mientras que las especies fúngicas causantes de “pudrición” se agrupan en diferentes categorías, como las nombradas marrón o cúbica, blanca y suave o blanda. Los hongos se nutren de componentes de pared celular obtenidos mediante enzimas que degradan los polímeros estructurales y con ello alteran las propiedades físico-mecánicas de la madera. La despolimerización de macromoléculas de pared celular la realizan mediante diversas enzimas hidrolíticas que la sintetiza aceleradamente, *e.g.* la degradación de celulosa cristalina se obtiene con endo-1,4-

species of the genres *Clorophyta*, *Chrysophyta*, and *Cianophyta*, which, when deteriorating wood, cause it to change color, as well as an increase in the absorption of solar radiation and water. However, the deterioration caused by bacteria and algae is less than the damage produced by fungi and xylophagous insects, the latter of which are the main causal agents of biodeterioration (Flower and Gonzalez-Meler, 2015).

In the construction and wood-based products industries, xylophagous fungi are accountable for great economic losses (Arbelo and Garbuyo, 2012). “Chromogenic” organisms are found in this group which, when penetrating the woody tissue via the hyphae, reach the cell cavities, an action that has the result of a change in color (Moglia *et al.*, 2015). Meanwhile, the fungal species that cause “rotting” are grouped into different categories, such as the so-called white-rot, brown-rot and soft-rot. Fungi feed off the components of cell walls obtained by enzymes that degrade the structural polymers, thus alter the physical and mechanical properties of the wood. The depolymerization of cell wall macromolecules is carried out with several hydrolytic enzymes that synthesize it rapidly, *e.g.* the degradation of crystalline is obtained with endo-1,4- $\beta$ -glucanases, exo-1,4- $\beta$ -glucanases, 1,4- $\beta$ -glucosidases and other accessory enzymes (Schmidt, 2007).

Meanwhile, for a complex polymer without three-dimensional ordering such as lignin, composed of the concatenation of phenylpropanoic acids and alcohols, for its degradation and mineralization, the fungus uses an enzyme complex with activities of oxidases and peroxidases. The fungal metabolic pathway to the degradation of this polymer begins with the action of lignin peroxidase, which break carbon-carbon bonds or ether bonds within the complex molecule to produce monomers. Another interesting enzymatic complex is the one produced

$\beta$ -glucanasas, exo-1,4- $\beta$ -glucanasas, 1,4- $\beta$ -glucosidasas y otras enzimas accesorias (Schmidt, 2007).

Mientras que, para un polímero complejo sin ordenamiento tridimensional como la lignina, conformada por la concatenación de ácidos y alcoholes fenilpropílicos, para su degradación y mineralización el hongo utiliza un complejo enzimático con actividades de oxidasas y peroxidasas. La vía metabólica fúngica para la degradación de este polímero inicia con la acción de la lignina peroxidasa, la cual lisa enlaces carbono-carbono o enlaces éter dentro de la compleja molécula para generar monómeros. Otro complejo enzimático interesante es el que producen algunos basidiomicetos xilófagos que ocasionan la pudrición blanca. Este complejo incluye a la lignina peroxidasa, manganeso peroxidasa, molécula versátil que emplean peróxido de hidrógeno como aceptor de electrones y la lacasa que utiliza al oxígeno molecular. Esta última enzima es una oxidasa constituida por un co-factor con cuatro átomos de cobre, cuyo aceptor de electrones es el oxígeno molecular. También, la lacasa degrada sustratos no fenólicos más difícilmente oxidables en presencia de co-oxidantes; 1-hidroxibenzotriazol (1-HBT), 2,2'-azino-bis-(ácido 3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico) o ácido violúrico (Subramanian *et al.*, 2014).

Entre los xilófagos más importantes y considerados perniciosos se tienen a los basidiomicetos, causantes de la pudrición marrón o cúbica (*e.g.* *Serpula lacrymans*, *Coniophora puteana*, *Antrodia vaillantii*, *Lentinus lepideus*), capaces de degradar rápidamente la celulosa, hemicelulosa y modificar estructuralmente la lignina. En la pudrición blanca, los basidiomicetos y algunos ascomicetos se nutren preferentemente de lignina, aunque pueden descomponer celulosa. Por la degradación de la lignina y la gran cantidad de celulosa intacta que no utilizan estos hongos, la madera adquiere un color "blanquecino". Entre las especies fúngicas representativas se encuentra a *Trametes versicolor*,

by some xylophagous basidiomycota that cause white rot. This complex includes lignin peroxidase, manganese peroxidase, a versatile molecule that uses hydrogen peroxide as an electron acceptor, and laccase, which uses molecular oxygen. The latter enzyme is an oxidase made up of a co-factor with four copper atoms, the acceptor of electrons is molecular oxygen. Also, laccase degrades non-phenolic substrates, more difficult to oxidize in the presence of co-oxidants; 1-hydroxybenzotriazole (1-HBT), 2,2'-azino-bis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) or violic acid (Subramanian *et al.*, 2014).

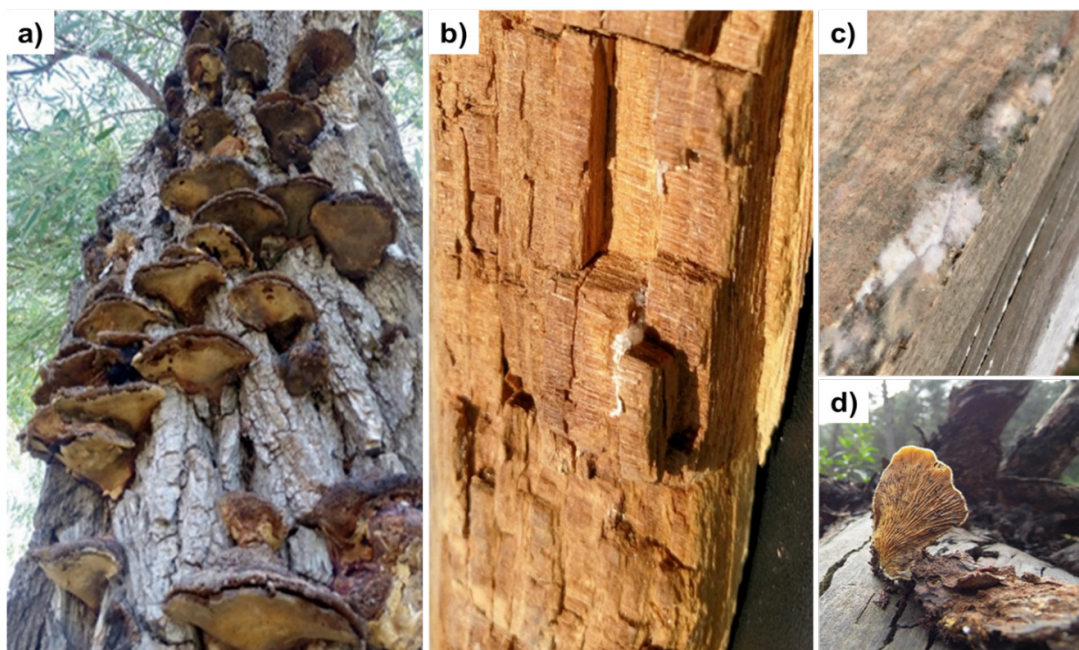
Some of the most important and harmful xylophagous organisms include basidiomycetes, which cause brown or cubid rot (*e.g.* *Serpula lacrymans*, *Coniophora puteana*, *Antrodia vaillantii*, *Lentinus lepideus*), capable of rapidly degrading cellulose, hemicellulose, and of structurally modifying lignin. In white rot, the basidiomycetes and some ascomycetes feed mostly of lignin, although they can decompose cellulose. Due to lignin degradation and the large amount of intact cellulose not used by these fungi, wood acquires a pale whit color. Some of the representative fungal species include *Trametes versicolor*, *T. hirsuta* and *Schizophyllum commune*. Meanwhile, ascomycetes that cause soft rot (*Chaetomium globosum*, *Monodictys putredinis*, *Hypocrea muroiana*, *Cryphonectria parasitica* and *Fusarium oxysporum*), the hyphae of which develop in the lumen and the inside of the secondary cell wall, mainly degrade cellulose, altering lignin structurally, causing a characteristic softening of the lignocellulosic material (Figure 1) (Patel *et al.*, 2013).

On the other hand, insects are a relevant and diverse group in the animal kingdom, with over one million species described and an amount of up to 30 million species yet to be discovered (Stork *et al.*,

*T. hirsuta* y *Schizophyllum commune*. Mientras que, los ascomicetos causantes de la pudrición suave o blanda (*Chaetomium globosum*, *Monodictys putredinis*, *Hypocrea muroiana*, *Cryphonectria parasitica* y *Fusarium oxysporum*), cuyas hifas se desarrollan en el lumen e interior de la pared vegetal secundaria, degradan principalmente celulosa alterando estructuralmente la lignina, con lo cual provocan un ablandamiento característico del material lignocelulósico (Figura 1) (Patel *et al.*, 2013).

Por otro lado, los insectos constituyen un relevante y diverso grupo dentro del reino animal, con aproximadamente más de un millón de especies descritas y una cantidad de hasta 30 millones de especies aún por conocer (Stork *et al.*, 2015). Asimismo, ellos exhiben una amplia versatilidad para nutrirse y sobrevivir. En relación con el hábito alimentario, los insectos utilizan, *e.g.* tejido vegetal

(2015). Likewise, they present a broad versatility to feed and survive. In terms of feeding habits, insects use, *e.g.* fresh plant tissue, organic animal matter in decomposition or dead plant matter. Such is the case of wood, and xylophagous insects carry this with the perforation and formation of galleries in search for cellulose and starch. This produces physical and mechanical damage and chromatic alterations in stored wood, process, service, and standing trees (Table 1) (Zanni, 2008). The insects that stand out in this group are *coleoptera* (beetles or woodworms) and *lepidoptera* (butterflies and moths), as well as *isoptera* (termites) and *hymenoptera* (wasps and ants). *Isoptera* and *coleoptera* are pointed out as producers of considerable damage to wooden structures and houses (NMX-C-222-1983; Blackwell and d'Errico 2000). Also, in large portions of North and Central America, bark



**Figura 1.** Daño provocado por hongos xilófagos en árbol en pie *Ganoderma applanatum* (a), en la construcción *Antródia vaillantii* (b), madera aserrada *Ceratocystis* sp. (c) y madera derribada *Pleurotus ostreatus* (d).

**Figure 1.** Damage caused by xylophagous fungi in a standing *Ganoderma applanatum* tree (a), in the construction *Antródia vaillantii* (b), sawn wood *Ceratocystis* sp. (c) and felled wood *Pleurotus ostreatus* (d).

fresco, materia orgánica en descomposición de origen animal o materia muerta vegetal. Tal es el caso de la madera y los insectos xilófagos, lo hacen mediante la perforación y formación de galerías en la búsqueda de celulosa y almidón. Con ello producen daño físico, mecánico y alteraciones cromáticas en madera almacenada, proceso, servicio y árboles en pie (Cuadro 1) (Zanni, 2008). En este grupo de insectos, destacan los *coleópteros* (escarabajos o carcomas) y *lepidópteros* (mariposas y polillas), al igual que *isópteros* (termitas) e *himenópteros* (avispas y hormigas). Los *isópteros* y *coleópteros* son señalados por producir daños considerables a estructuras y bienes inmuebles de madera (NMX-C-222-1983; Blackwell y d'Errico 2000). También, en gran parte del Norte y Centro América insectos descortezadores del género *Dendroctonus* (*D. frontalis*, *D. mexicanus*) son la principal plaga en bosques de pino, anualmente miles de árboles se pierden por el perjuicio provocado (FAO, 2007).

La protección de la madera de baja durabilidad con preservadores químicos, aunque práctica y económica es eco-tóxica, requiere su reemplazo

insects of the genus *Dendroctonus* (*D. frontalis*, *D. mexicanus*) are the main pest in pine forests; they cause the loss of thousands of trees (FAO, 2007).

The protection of low-durability wood with chemical preservatives, however practical and cheap, is eco-toxic and requires immediate replacement with eco-friendly preservatives. Therefore, the purpose of this work is to establish the bases of protection for wood using microbiological strategies.

### Classification of wood according to its resistance to xylophagous organisms

Wood can be categorized according to its use and durability (NMX-C-239-1985) and is subject to different levels of risk and to deterioration by xylophagous organisms. The different resistance present in this material is due to different structural and chemical factors contained in the woody tissue, typical variables of the species, age and development conditions at the time of cutting down. According to A.S.T.M D-2017-81, the classification of wood

**Cuadro 1. Principales insectos xilófagos y las características de los daños que ocasiona en la madera.**  
**Table 1. Main xylophagous insects and the characteristics of the damages they cause on wood.**

Orden	Familia	Especie	Madera afectada	Ciclo biológico	Autor
Isoptera	Termitidos	<i>Reticulitermes lucifugus</i> Rossi	Todas (celulosa), los insectos forman galerías separadas por finos tabiques.	Variable	Ulyshen, 2015
Lepidoptera	Cossidos	<i>Cossus cossus</i> L.	Latifoliadas con humedad, producen grandes orificios separados por tabiques gruesos, generando galerías ovales y limpias.	3 años	
Hymenoptera	Sirícidos	<i>Sirex gigas</i> L. <i>Paururus Juencus</i> L.	Trozas de resinas húmedas. Coníferas, forman galerías circulares llenas de aserrín.	3 años	
Coleoptera	Bostríchidos	<i>Apate capucina</i> L.	Latifoliadas verdes, forman galerías limpias en forma de Y; Galerías larvarias llenas de aserrín.	1 año	Berrocal, 2007;
	Líctidos	<i>Lictus linearis</i> Goez	Latifoliadas tropicales, se producen galerías de diámetro intermedio.	1 año	Agboton <i>et al.</i> , 2017
		<i>Lictus brunneus</i> Steph.	En maderas tropicales se sabe que forman galerías circulares llenas de aserrín.	1 año	

inmediato con preservadores eco-amigables. Por lo que el propósito de este trabajo es establecer las bases de la protección de la madera mediante estrategias microbiológicas.

### Clasificación de la madera de acuerdo con su resistencia a xilófagos

La madera puede ser categorizada según el uso y durabilidad (NMX-C-239-1985) y está sujeta a distintos niveles de riesgo y al deterioro por xilófagos. La diferente resistencia presente en este material se debe a diversos factores estructurales y químicos contenidos en el tejido leñoso, variables propias de la especie, edad y condiciones de desarrollo al momento de la tala. De acuerdo con A.S.T.M D-2017-81, la clasificación de la madera por su durabilidad natural se observa en el Cuadro 2A. Esta característica se pondera en años, dicho de otra forma, cuanto tiempo es capaz de mantener sus propiedades mecánicas después del contacto con factores am-

by its natural durability is shown in Table 2A. This feature is pondered in years, or in other words, how long it is capable of maintaining its mechanical properties after making contact with environmental factors. Later, the Board of the Cartagena Agreement (1988) categorized this material into five classes, according to the deterioration produced by xylophagous organisms (Table 2B). However, Bobadilla *et al.*, (2005) catalogue its resistance according to the "Findlay Criterion", by weight loss after the attack by fungi (Table 2C) (Findlay, 1951). The latter criterion highlights the importance of wood deterioration cause by xylophagous fungi, as well as the relevance of their control in which it is possible to use microbiological methods with this goal.

### Main chemical preservatives used on wood

The chemical wood preservation industry started in the 19th Century and has had great

**Cuadro 2. Criterios y clasificación de la madera con base a su resistencia y durabilidad natural.**  
**Table 2. Criteria and classification of wood based on its natural resistance and durability.**

A) Clasificación de la resistencia de la madera por su durabilidad natural (A.S.T.M D-2017-81)		
Promedio de pérdida de peso (%)	Promedio de peso residual (%)	Clasificación y resistencia
0-10	90-100	Altamente resistente
11-24	76-89	Resistente
25-44	56-75	Moderadamente resistente
45 o más	55 o menos	Ligeramente resistente/no resistente
B) Clasificación de la durabilidad natural de las maderas en el caso de deterioro producido por hongos xilófagos		
Años		Durabilidad
Más de 20		Muy durable
15- 20		Durable
15-10		Moderadamente durable
10-5		Poco durable
Menos de 5		No durables
C) Clasificación por resistencia de las maderas de acuerdo con la pérdida de peso		
Pérdida de peso (%)		Categoría de resistencia
Inferior a 5		Muy resistente
5-10		Resistente
10-20		Moderadamente resistente
20-30		No resistente
Superior a 30		Sin resistencia

bientales. Posteriormente, la Junta del Acuerdo de Cartagena (1988) categoriza este material en cinco clases, acorde al deterioro producido por xilófagos (Cuadro 2B). Sin embargo, Bobadilla *et al.*, (2005) catalogan su resistencia conforme al “Criterio de Findlay”, por pérdida de peso después del ataque por hongos (Cuadro 2C) (Findlay, 1951). Este último criterio destaca la importancia del deterioro de la madera causado por hongos xilófagos, así como la relevancia de su control en donde es posible utilizar métodos microbiológicos con tal fin.

### Principales preservadores químicos utilizados en madera

La industria de la preservación química de la madera se desarrolló hasta el comienzo del siglo XIX debido a que ha sido de gran importancia tecnológica, social, histórica y económica, ya que el hombre ha intentado protegerla del deterioro físico y biológico con diversos agentes preservadores. Las mezclas de sales minerales con moléculas orgánicas han sido extremadamente eficaces, donde su clasificación depende de su naturaleza y función (ver el Cuadro 3). Estas sales controlan hongos e insectos en madera en servicio y que está en contacto con el suelo. Su uso se oficializó por la agencia estadounidense protectora de madera (AWPA por sus siglas en inglés) mediante la norma P5-83, tiempo después en México se oficializó (AWPA P5-83). Compuestos como las sales de Cobre-cromo-arsenicales (CCA) son preservadores extremadamente efectivos. Materiales lignocelulósicos tratados con CCA expuestos a condiciones ambientales extremas pueden mantener una vida útil por décadas. Una comprobación realizada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica (USDA). Donde se demostró que estacas de madera preservada con CCA, resistieron al ataque de diversos organismos xilófagos por más

technological, social, historical and economic importance, since humans have tried to protect wood from physical and biological deterioration with different preserving agents. The mixtures of mineral salts with organic molecules have been extremely efficient; their classification depends on their nature and function (see Table 3). These salts control fungi and insects in wood in service and that is in touch with the ground. Its use was officialized by the American Wood Protection Association (AWPA) by norm P5-83, and some time later, it became official in Mexico (AWPA P5-83). Compounds such as Copper-chromium-arsenical (CCA) salts are extremely effective preservatives. Lignocellulosic materials treated with CCA exposed to extreme environment conditions can have a lifespan of decades. A verification carried out by the United States Department of Agriculture (USDA) showed that wooden stakes preserved with CCA resisted the attack of diverse xylophagous organisms for over 60 years; the USDA foresees a lifespan of these materials five to ten times longer than without any preservations.

The indiscriminate release of these pesticides in uses of wood has contributed to the alarming deterioration of the ecosystem in order to increase the average lifespan of wood products at a minimum cost. This social and cultural practice is now an emerging and multi-factor environmental problem with a complex solution. However, in the 20th Century, some control measurements were set in motion for the release of pesticides in developed countries which were then copied and adapted in developing countries. One of them was the Food Quality Protection Act emitted by the U.S. government in 1966, and which included a proposal to drastically restrict the use of conventional pesticides. At the same time, the definition of pesticide proposed by the World Health Organization (WHO) was modified, and



**Cuadro 3. Principales sustancias utilizadas en la industria de la preservación de madera.**  
**Table 3. Main substances used in the wood preservation industry.**

Criterio	Tipo	Sustancia	Autor	
De acuerdo con el tipo de daño	Pudrición	1-Cromo, Cobre y Arsénico (CCA)/CrO <sub>3</sub> 65.5, CuO 18.1, Ar <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 16.4	AWPA P5-83	
		2-Cobre, Azoles orgánicos (CA)		
		3-Cobres, Azoles orgánicos y Boro (CAB)		
		4-Cobre y Amonios Cuaternarios (ACQ)		
		5- Boro		
	Mancha azul	6-Quinolinolato de cobre/C <sub>18</sub> H <sub>12</sub> CuN <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Lebow <i>et al.</i> , 2015	
		7-Tribromofenato de sodio/C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> Br <sub>3</sub> NaO		
	Retardantes de fuego	8-Carbendazimas/ C <sub>9</sub> H <sub>9</sub> N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	NMX-C-222-1983	
		9-Tetraborato de sodio/Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> · 10H <sub>2</sub> O 10-Ácido bórico/H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> 11-Sulfatos y fosfatos amónicos		
	Protectores contra luz ultravioleta y calor	12-Pinturas con pigmentos metálicos	Veronovski <i>et al.</i> , 2013; Auffan <i>et al.</i> , 2014	
	De acuerdo con su naturaleza química	Oleosos	13-Creosota	Singh y Singh, 2014;
Oleosolubles		14-Pentaclorofenol (PCF)/C <sub>6</sub> HCl <sub>5</sub> O	Freeman <i>et al.</i> , 2003	
		15-Naftenatos		
		16-Pentaclorofenato de sodio/C <sub>6</sub> Cl <sub>5</sub> NaO		
		17-Oxido tributil estañoso/C <sub>24</sub> H <sub>54</sub> OSn <sub>2</sub>		
		18-Quinolinolato de cobre/ C <sub>18</sub> H <sub>12</sub> CuN <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		
		19-Sales múltiples		
Hidrosolubles		20-Arsénico-cobre-amoniacaes (ACA)/As <sub>2</sub> 50,20 %, Cu 49,80 %		
		21-Cobre-cromo-arsenicales (CCA)/As <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -5H <sub>2</sub> O 56 %, SO <sub>4</sub> Cu-2H <sub>2</sub> O 33 %, C <sub>2</sub> O <sub>7</sub> K <sub>2</sub> 11 %		
		22-Cobre-cromo-boro (CCB)/CuO, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>		
		23-Compuestos de boro		
Otras sales		24-Cromo-Zinc-Cloro (CZC)/CrO <sub>3</sub> 20 %, Cl <sub>2</sub> Zn 80 %		
		25-Flúor-Cromo-Arsénico-Fenol		

de 60 años, la USDA predice una vida útil para estos materiales de cinco a diez veces mayor que sin preservar.

La liberación ambiental indiscriminada de estos plaguicidas de uso en la madera ha coadyuvado al alarmante deterioro del ecosistema. Con la finalidad de aumentar la vida media de productos maderables a un mínimo costo económico. Una práctica sociocultural que ahora es un problema ambiental emergente y multifactorial cuya solución es compleja. Sin embargo, en el siglo XX algunas medidas de control para la liberación de plaguicidas se pusieron en marcha en países desarrollados, que

included biopesticides, such as dissuasive agents with a confounding effect, inhibitor of oviposition, anti-feeding and repellent, as well as biological control agents (Konradsen *et al.*, 2003). With these measures adopted and adjusted for Mexican Legislation, a new academic, biotechnological and commercial opportunity opens up for the design of preservatives of microbiological origin for their use on low-durability wood. The control of the biodeterioration of lignocellulosic materials with preservatives based on the lifestyle and microbial strategies of ecological invasion is a non-toxic alternative.

tiempo después fueron copiadas y adaptadas en los países subdesarrollados. Una de ellas fue Food Quality Protection Act emitida por el gobierno estadounidense en 1996. En ella, se propuso restringir drásticamente el uso de insecticidas convencionales. Paralelamente, la definición de plaguicida propuesta por la Organización Mundial de la Salud (OMS) se modificó e incluyó a los bioplaguicidas tales como los agentes disuasivos con efecto confusor, inhibidor de la oviposición, anti-alimentario y repelente, así como a los agentes de control biológico (Konradsen *et al.*, 2003). Con estas medidas adoptadas y adecuadas en la legislación mexicana, una nueva oportunidad académica, biotecnológica y comercial se propicia para el diseño de preservadores de origen microbiano para su aplicación en madera de baja durabilidad. El control del biodeterioro de materiales lignocelulósicos mediante preservadores basados en el estilo de vida y estrategias microbianas de invasión ecológica es una alternativa no tóxica.

### **Compuestos de origen natural con potencial preservador de madera**

Hoy en día, métodos de protección con componentes naturales son la alternativa tecnológica para sustituir a los convencionales y nocivos preservadores de la madera de baja durabilidad. La aplicación de esta tecnología eco amigable es lenta y escasamente popular, debido a la practicidad y efectividad a bajo costo económico de los preservadores convencionales.

Dentro de los métodos alternativos en la preservación se exhiben debilidades tecnológicas que se tienen que superar y que son el reto que enfrentar, resolver con rapidez, debido al alarmante deterioro ambiental y al cambio de actitud gubernamental. Entre ellas se incluyen a, las diferencias obtenidas en condiciones controladas (laboratorio) y el

### **Natural compounds with wood preserving potential**

Nowadays, protection methods with natural components are the technological alternative to replace the conventional and harmful preservatives for low-durability wood. The use of this eco-friendly technology is slow and scarcely popular, due to the practicality and effectiveness at a low cost of conventional preservatives.

Among the alternative preservation methods, there are technological flaws that must be overcome, and that are the challenge to be faced, solved rapidly due to the alarming environmental deterioration and the change in attitude of the government. Some of these methods include the differences obtained under controlled conditions (laboratory) and the yield in the field, hardships in efficiency related to exposure, environmental conditions, and legislation conflicts worldwide (Singh and Singh, 2012). However, different natural compounds have justified their efficiency as wood preservatives. Historically, plant extracts were the molecular basis for the chemical synthesis of pyrethroids and nicotinoids. Another successful example of insecticides are derived from the *Azadirachta indica* (neem) or *Enterolobium cyclocarpum* (guanacaste) trees, such as their essential oils or compounds contained in the heartwood, such as azadirachtin (Martinez *et al.*, 2012; Raya-González *et al.*, 2013). Likewise, microbial agents of biological control of known use and efficiency, and that compose a paradigm in the control of pests, such as *Bacillus thuringiensis*, encourages to know the style and the life cycle of bacteria and other microorganism so as to use them in the preservation of wood. Likewise, new or novel synthetic molecules and natural products with biological activity such as pest controllers are surfacing, as a partial solution for the control of deleterious organisms that damage

rendimiento en campo, las dificultades en eficacia relacionada con la exposición, condiciones ambientales y conflictos en legislación a nivel mundial (Singh y Singh, 2012). Sin embargo, compuestos naturales diferentes, han justificado su eficacia como perseverantes de la madera. Históricamente, los extractos de plantas fueron la base molecular para la síntesis química de los piretroides y nicotinoides. Otro ejemplo exitoso de insecticidas son los derivados de los árboles *Azadiracta indica* (neem) o de *Enterolobium cyclocarpum* (parota), tales como sus aceites esenciales o componentes contenidos en el duramen como la azadiractina (Martinez *et al.*, 2012; Raya-González *et al.*, 2013). Asimismo, agentes microbianos de control biológico de conocido uso, eficacia y que conforman un paradigma en el control de plagas, tal como *Bacillus thuringiensis*, motiva a conocer el estilo y ciclo de vida de bacterias y otros microorganismos con la finalidad de usarlos en la preservación de la madera. De igual forma, nuevas o novedosas moléculas sintéticas y productos naturales con actividad biológica como controladores de plagas están surgiendo como una solución parcial para el control de organismos deletéreos que dañan la madera (Damian *et al.*, 2010; González-Laredo *et al.*, 2015; Ramírez-López *et al.*, 2016).

La planta sintetiza metabolitos secundarios en la corteza, fruto, hoja, madera, semilla o raíz. Su presencia se evidenciará de acuerdo con su entorno, a sus ciclos circadianos y de vida, donde su función vegetal es variada, entre las que destaca la defensa vegetal y en este arsenal químico vegetal se han descrito compuestos bioactivos inhibidores del crecimiento de patógenos. Al respecto, extractos en hoja de *Cinnamomun zeylanicum* Ness. contiene componentes que son eficaces para combatir algunos hongos y termitas xilófagas (Cheng *et al.*, 2006; Tascioglu *et al.*, 2013). Recientemente Singh y Singh (2012) reportaron que sustancias de hojas

wood (Damian *et al.*, 2010; González-Laredo *et al.*, 2015; Ramírez-López *et al.*, 2016).

The plant synthesizes secondary metabolites in the bark, fruit, leaf, wood, seed, or root. Its presence will become evident according to its surroundings, its circadian rhythm and life cycles, where its plant function is varied, including plant defense, and in this chemical arsenal of the plant, several bioactive compounds, inhibitors of the growth of pathogens, have been described. In this regard, extracts in *Cinnamomun zeylanicum* Ness. leaves contain components that are efficient to fight some xylophagous fungi and termites (Cheng *et al.*, 2006; Tascioglu *et al.*, 2013). Singh and Singh (2012) recently reported that leaf substances in *Elaeocarpus dentatus* display antifungal activities (brown rot), like *Citrus x limon*, *Rosmarinus officinalis*, *Thymus vulgaris*, *Cinnamomum zeylanicum* Ness. *Syzygium aromaticum* essential oils, are efficient to control growth in xylophagous fungi that produce mold; the most typical are species of the genres *Penicillium*, *Trichoderma*, *Fusarium* and *Aspergillus* (Yang and Clausen, 2007; Matan and Matan, 2008) (Table 4). Other studies reported by Kartal *et al.*, (2009) show a comparison of formulations based on cinnamaldehyde, cinnamic acid, cassia oils, and wood tar, which inhibited growth in *Tyromyces palustris* and *Trametes versicolor*, as well as providing resistance against the underground termite *Coptotermes formosanus*. Authors such as Stirling *et al.*, (2007) pointed out that *Cedrela odorata* L. compounds present a biocidal action, due to tujaplicin,  $\beta$ -tujaplicinol, and plictic acid, toxic in *Coniophora puteana*, *Postia placenta* and *Trametes versicolor*, with metal chelating characteristics. Plictic acid and ácido plicático and  $\beta$ -tujaplicinol simultaneously showed and interesting antioxidant activity. Tascioglu *et al.* (2012) reported that both bark (*Acacia mollissima*) and heartwood (*Schinopsis*

en *Elaeocarpus dentatus* presentan actividad anti-fúngica (podredumbre parda), de igual forma, aceites esenciales de *Citrus x limon*, *Rosmarinus officinalis*, *Thymus vulgaris*, *Cinnamomun zeylanicum* Ness. y *Syzygium aromaticum*, son eficaces para el control de crecimiento en hongos xilófagos productores de moho, los más típicos son especies del género *Penicillium*, *Trichoderma*, *Fusarium* y *Aspergillus* (Yang y Clausen, 2007; Matan y Matan, 2008) (Cuadro 4). En otros estudios reportados por Kartal *et al.*, (2009), muestran una comparación de formulaciones a base de cinamaldehído, ácido cinámico, aceites de cassia y alquitrán de madera, los cuales inhibieron el crecimiento en *Tyromyces palustris* y *Trametes versicolor*, además de proporcionar resistencia contra la termita subterránea *Coptotermes formosanus*. Autores como Stirling *et al.*, (2007) señalaron que compuestos de *Cedrela odorata* L. presentan acción biocida, debida a tujaplicina,  $\beta$ -tujaplicinol y ácido plicático, tóxicos en *Coniophora puteana*, *Postia placenta* y *Trametes versicolor*, con características quelantes de metales, simultáneamente el ácido plicático y  $\beta$ -tujaplicinol, mostraron una interesante actividad antioxidante. Tascioglu *et al.* (2012) reportaron que extractos de corteza (*Acacia mollissima*) y duramen (*Schinopsis lorentzii*), mostraron actividad antifúngica debido al gran contenido de taninos condensados, de igual forma, los flavonoides exhibieron una actividad inhibitoria del crecimiento de los hongos *Coniophora puteana*, *Irpex lacteus*, *Pleurotus ostreatus* y *T. versicolor* (Carrillo-Parra *et al.*, 2011; Nascimento *et al.*, 2013). Se evidencia que las plantas presentan un variado perfil de metabolitos secundarios, que reprimen el crecimiento de una vasta variedad de microorganismos. Sin embargo, el interés se enfoca en la búsqueda de nuevos componentes vegetales para el control de patógenos y se discrimina su importancia en el control de microorganismos deterioradores. Por tanto, la relevancia de

*lorentzii*) samples displayed antifungal activity due to the large content of condensed tannins. Likewise, flavonoids presented an activity of growth inhibition of the fungi *Coniophora puteana*, *Irpex lacteus*, *Pleurotus ostreatus* and *T. versicolor* (Carrillo-Parra *et al.*, 2011; Nascimento *et al.*, 2013). The plants present a varied profile of secondary metabolites, that suppress the growth of a wide variety of microorganisms. However, our interest is placed in the search for new plant components for the control of pathogens and their importance in the control of deteriorant microorganisms is discriminated. Therefore, the relevance of plant components in the protection of low-durability wood is a priority and calls for immediate attention.

#### **Bacterial activity antagonistic to xylophagous fungi**

Apart from components identified as having wood preservation capabilities from plants, such as essential oils, waxes, saps and extractives, there is a proposal to use microorganisms or their exudates as agents with antagonistic activity in the protection of wood against biological deterioration.

Out of the group of fungi that produce exudates, the species of the genus *Trichoderma* stand out, which suppress the growth of plant pathogens by microparasitism processes and/or the production of antifungal toxins (Widmer, 2014). Also, a wide group of bacteria are able to antagonize the development of some fungi using various action mechanisms. This group includes plant growth-promoting rhizobacteria (PGPRs), which, by producing siderophores (Saha *et al.*, 2016), antibiotics (Tariq *et al.*, 2017) or by competition for colonization spaces in roots and the production of organic compounds (COVs), generate an excellent and a distinctive antimicrobial effect (Table 5).

**Cuadro 4. Principales hongos causantes pudrición blanca y parda en madera (Guillén *et al.*, 2005; Schwarze, 2007; Singh y Singh, 2014).  
Table 4. Main fungi responsible for white rot and brown rot in wood (Guillén *et al.*, 2005; Schwarze, 2007; Singh y Singh, 2014).**

Especie fúngica	Tipo de pudrición	Madera afectada	Características del hongo	Infección
<i>Xylaria hypoxylon</i>	Blanca (esponjosa)	Latifoliadas, recientemente apeada o apilada.	Carpóforo anamorfo bifurcado y filamentosos, de himenio inserto en la superficie externa del ascoma (negro), ausente de pie, sabor u olor.	Se desarrolla sobre materia vegetal en descomposición, debido a la degradación de lignina produce podredumbre blanca.
<i>Eutypa flavovirens</i>	Blanca (fibroso veteado)	Latifoliadas tanto en pie como recién apeadas.	Tiene pseudostromas, peritecios con paredes oscuras, ascas cilíndricas, diatripáceos en forma alargada con ascosporas.	Ascomicetos que desarrollan fructificaciones sobre la madera, se ablanda, vetea, con cavidades; pierde peso: hifas de 0.5 a 5 µ, de q las menores, azuladas. Parte superior de los cuerpos fructíferos con pelos característicos.
<i>Stereum hirsutum</i> Willd	Blanca	Latifoliadas tanto en pie como recientemente apeadas.	Los cuerpos de fructificación son costrosos, en visera, ondulados, grises en la parte superior y amarillentos en la parte inferior.	Saprofita de madera muerta o viva, produciendo podredumbre blanca, basidiomicete responsable de la pudrición blanca de la madera, presenta fuerte actividad ligninolítica lacasa y manganeso peroxidasa.
<i>Schizophyllum commune</i> Fr.	Blanca	De coníferas y latifoliadas con alta humedad (Roble, Haya y Pino).	Cuerpos de fructificación encespelados, blancos de 3 cm y cubiertos de pelillos finos. Laminillas de los cuerpos de fructificación con borde partido a lo largo de toda su longitud.	Presenta actividad lacasa, manganeso peroxidasa y las lignino peroxidasa. Inespecífico de hospedero, se reporta creciendo sobre madera muerta o árboles en pie. Considerado una plaga causando daños a los árboles de plantaciones forestales, parques y jardines.
<i>Polysticus versicolor</i> Fr.	Blanca (fibrosa)	Latifoliadas y algunas coníferas.	La madera se decolora y las manchas se extienden: Hifas de 0,5 a 5 µ; cuerpo fructífero con tubos en la parte inferior sensible a los taninos. Cuerpos de fructificación coloreados superiormente de forma concéntrica.	En considerado un hongo agresivo para la madera, degradándola rápidamente, parasitando árboles en pie. La infección se extiende de arriba y abajo del tronco desde el punto de inicio, recorriendo hacia fuera en las ramas e incluso en las raíces. En los árboles vivos el hongo produce esporóforos en gran abundancia, pero rara vez se produce fructificación en la madera.
<i>Chaetomium globosum</i> Kunze	Parda y blanca	De coníferas y latifoliadas con altos grados de humedad.	Hongo con fuerte presencia en suelo y plantas, se caracteriza por degradar la pulpa craft, Esta especie forma un micelio escaso y delgado, pero con numerosos ascocarpos verde oliva, que se distribuyen uniformemente sobre la superficie de la colonia.	Ataca a la madera que queda superficialmente blanda y al secar se resquebraja. Resiste a la anaerobiosis; los daños dependen de la densidad de la madera y la presencia de sales. Produce cavidades en la subcapa S2 de la pared celular.
<i>Serpula lacrymans</i> Wulf.	Parda seca (cúbica)	Coníferas y latifoliadas con distintos grados de humedad.	La madera se decolora, ablanda y agrieta: micelio externo de blanco pasa a rojo, coloreado quinoide; hifas de 2,5 a 4 µ. Micelio incoloro muy ramificado, hifas de 1,8 µ. Cuerpos de fructificación con basidiosporas que colorean de rojo-oro viejo. Cordones miceliares, los rizomorfos para transporte de agua, de 5,8 µ.	Organismo causante de severos daños a la madera, con la capacidad de generar pudrición en bajas condiciones de humedad. <i>S. lacrymans</i> es considerado como el destructor más perjudicial de materiales de construcción de madera en interiores en regiones templadas.

**Continúa Cuadro 4.**  
**Continued Table 4.**

<i>Lenzites abietina</i> Bull.	Parda húmeda	Coníferas	Cuerpos de fructificación coloreados, hifas de 4 µ. Cistidios de gran tamaño.	Organismo con alta presencia en construcciones y todo tipo de objetos manufacturados con madera, degradan la celulosa y lignina en menor medida. En sitios en donde se almacena la madera, este hongo produce pérdida de peso en este material lignocelulósico. La madera se colorea, amarillenta, obscurece. Micelio blanco pasa a marrón purpura; hifas de 1-2,5 µ. Resistente a las creosotas, a altas temperaturas, a los medios anaeróbicos. Sin luz origina fructificación.
<i>Lentinus lepideus</i>	Parda húmeda	Coníferas	Se distingue por presentar un sombrero convexo de 12 cm y pie de 7cm Cutícula de blanco a crema, escamosa. Láminas adnatas y decurrentes, espaciadas. Saprofito de troncos, tocones, muebles, madera vieja de ferrocarril y postes.	

los componentes vegetales en la protección de la madera de baja durabilidad se establece como una prioridad de atención inmediata.

#### Actividad bacteriana antagónica de hongos xilofagos

Además de componentes identificados con capacidad preservante de madera, procedentes de plantas como aceites esenciales, ceras, resinas y extractivos, se propone la opción de utilizar a los microorganismos o sus exudados como agentes con actividad antagónica en la protección de la madera contra el deterioro biológico. Del grupo de hongos productores de exudados destacan las especies fúngicas del género *Trichoderma*, que reprimen el crecimiento de fitopatógenos mediante procesos de micoparasitismo y/o producción de toxinas antifúngicas (Widmer, 2014). También, un amplio grupo de bacterias son capaces de antagonizar el desarrollo de algunos hongos mediante variados mecanismos de acción. En este grupo se encuentran las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPRs), que por medio de la producción de sideróforos (Saha *et al.*, 2016), antibióticos (Tariq *et al.*, 2017) o competencia por espacios de

COVs are organic molecules with a molecular mass of <300 Da and their main characteristic is a high vapor pressure that facilitates its volatilization (Zou *et al.*, 2007). Some have anti-fungal potential and can act at a distance by diffusion in the air *e.g.* la rhizobacteria *Arthrobacter agilis* UMCV2, in an *in vitro* system, limited the growth of the fungi *Botrytis cinerea* and of the oomycete *Phytophthora cinnamomi*, due to the production of amine dimethylhexadecylamine (Velázquez-Becerra *et al.*, 2013). Likewise, with this experimental approach, Orozco-Mosqueda *et al.*, (2015) characterized the anti-fungal activity of diverse amines with antagonistic action on four strains of the xylophagous fungi *Hypocrea* sp. (UMTM3) and *Fusarium* sp. (UMTM13) obtained by fungal scrutiny in wood in decomposition, the origin of which was a pine-oak forest. The *vitro* test showed that the amines evaluated presented an inhibiting effect on the growth of the UMTM fungal isolations, in which dimethylhexadecylamine stood out. Due to its fungal deadliness, it is a potentially useful biomolecule in the preventive treatment of wood against the attack of xylophagous fungi and blue stain fungus. Included in the main bacterial genuses identified as producers of COVs is *Pseudomonas*,

colonización en raíces y producción de compuestos orgánicos volátiles (COVs), generan un excelente y distintivo efecto antimicrobiano (Cuadro 5).

Los COVs son moléculas orgánicas con masa molecular de <300 Da, se caracterizan por tener una alta presión de vapor que facilita su volatilización (Zou *et al.*, 2007). Algunos tienen potencial antifúngico y pueden actuar a distancia a través de su difusión por el aire *e.g.* la rizobacteria *Arthrobacter agilis* UMCV2, en un sistema *in vitro* limitó el crecimiento del hongo *Botrytis cinerea* y

since *Pseudomonas* spp. synthesize hydrocyanic acid (HCN), a growth inhibitor in lignocellulosic pathogens. This metabolite is produced from glycine in essentially microaerophilic conditions, where the HCN synthetases codified by the genes *hcnABC* are crucial for the competition of *P. fluorescens* (Haas and Défago, 2005). Other bacterial species of this genus that produce fungicides are *P. chlororaphis* (cyclohexanol), *P. corrugata* (2-ethyl-1-hexanol), *P. aurantiaca* (nonanal, benzothiazole and dimethyl sulfate). The compound 2,4-Di-*tert*-butylphenol

**Cuadro 5. Clasificación de las PGPRs de acuerdo con el antagonismo con fitopatógenos.**  
**Table 5. Clasificación de las PGPRs depending on the antagonism with phytopathogens.**

PGPRs	Microrganismo antagonico	Compuesto sintetizado	Efecto inducido en plantas y fitopatógenos	Autor
	<i>Bacillus pumilus</i> y <i>Bacillus licheniformis</i> .	Giberelinas GA1, GA2, GA3 y GA4	Elongación del tallo de aliso ( <i>Alnus glutinosa</i> [L.] Gaertn.).	Gutiérrez-Mañero <i>et al.</i> , 2001
Directo	<i>Pseudomonas fluorescens</i> y <i>Burkholderia cepacia</i>	Ácido indol acético, sideróforos y ácido salicílico	Son eficientes en la promoción del crecimiento vegetal en cultivos de importancia económica.	Sivasakthi <i>et al.</i> , 2014
	<i>Azotobacter</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Mesorhizobium</i> , <i>Bacillus</i> .	Hormonas vegetales, Ácido indol acético, amoníaco, cianuro de hidrogeno, sideroforos, solubilización de fosfatos	Promueve el crecimiento vegetal de la planta e inhibición de fitopatógenos como <i>Aspergillus</i> , <i>Fusarium oxysporum</i> , <i>F. solani</i> y <i>Rhizoctonia botanica</i> . Inhibe el crecimiento de <i>Fusarium</i> sp., interactuando con las moléculas de colesterol, interrumpe la membrana citoplasmática fúngica, crea canales transmembranales, que permiten la liberación de iones vitales como el K <sup>+</sup>	Ahmad <i>et al.</i> , 2008
	<i>Bacillus subtilis</i> .	Iturina A	Inhibición de fitopatógenos como <i>Curvularia</i> sp. y <i>Pyricularia grisea</i> . Genera un efecto de biocontrol a través de la acción de las proteínas Cry1Ab y Cry1Ac.	Ariza y Sánchez, 2012; Liu <i>et al.</i> , 2015
Indirecto	<i>Bacillus</i> sp.	Metabolitos secundarios con actividad anti fúngica	Promueve el crecimiento vegetal de la plata e inhibición de fitopatógenos como <i>Macrophomina phaseolina</i> , <i>Fusarium oxysporum</i> , <i>F. solani</i> , <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> , <i>Rhizoctonia</i> y <i>Colletotricum</i> sp., por medio de enzimas mucolíticas como quitinasa, β(1,3)-glucanasa y β(1,4)-glucanasa que degradan los componentes de la pared celular de hongos, la quitina, B(1,3)-glucano y enlaces glucosídicos son lisados.	Tejera <i>et al.</i> , 2012
	<i>Bacillus</i> sp.	Ácido indol acético, sideróforos, fitasa. Ácidos orgánicos, ACC desaminasa, cianógenos, enzimas líticas, oxalato oxidasa, fuentes de fosfatos orgánicos, potasio y zinc.		Kumar <i>et al.</i> , 2012

del oomiceto *Phytophthora cinnamomi*, debido a la producción de la amina dimetilhexadecilamina (Velázquez-Becerra *et al.*, 2013). Asimismo, con este enfoque experimental Orozco-Mosqueda *et al.*, (2015) caracterizaron la actividad antifúngica de diversas aminas con acción antagonista sobre cuatro cepas de los hongos xilófagos *Hypocrea* sp. (UMTM3) y *Fusarium* sp. (UMTM13) obtenidos mediante un escrutinio fúngico en madera en descomposición cuyo origen fue un bosque de pino-encino. El ensayo *in vitro* evidenció que las aminas evaluadas mostraron un efecto inhibitorio sobre el crecimiento de los aislados fúngicos UMTM, donde destacó la dimetilhexadecilamina. Por su letalidad fúngica es una biomolécula potencialmente útil en el tratamiento preventivo de la madera contra el ataque de hongos xilófagos y de la mancha azul. Dentro de los principales géneros bacterianos identificados como interesantes productores de COVs es *Pseudomonas*. Ya que *Pseudomonas* spp. sintetizan ácido cianhídrico (HCN), un inhibidor del crecimiento de patógenos lignocelulósicos. Este metabolito se produce a partir de glicina en condiciones esencialmente microaerófilas, donde las sintetasas de HCN codificadas por los genes *hcnA-BC* son fundamentales para la competencia de *P. fluorescens* (Haas y Défago, 2005). Otras especies bacterianas de este género que producen antifúngicos son: *P. chlororaphis* (ciclohexanol), *P. corrugata* (2-etil-1-hexanol), *P. aurantiaca* (nonanal, benzotiazol y trisulfuro de dimetilo). El compuesto 2,4-Di-*ter*-burtilfenol lo produce *Lysobacter enzymogenes* ISE13, utilizado en la represión del ciclo de vida del hongo *Colletotrichum acutatum* y del oomiceto *Phytophthora capsici*, ya que inhiben el crecimiento micelial, la esporulación y la germinación de esporas y zoosporas, así como también limitar la formación del apresorio de *C. acutatum*

is produced by *Lysobacter enzymogenes* ISE13, used in the suppression of the life cycle of the fungus *Colletotrichum acutatum* and the oomycete *Phytophthora capsici*, since they inhibit mycelial growth, sporulation and the germination of spores and zoospores, as well as limiting the formation of the appressorium of *C. acutatum* (Pedraza, 2015). Also, an important number of strains of the genus *Paenibacillus* can act as antagonists to pathogenic fungi, such as *P. ehimensis* KWN38, which synthesizes butanol, which produces an inhibition (>50 %) in the development of hyphae of the fungi *Rhizoctonia solani*, *Fusarium oxysporum* and of the oomycete *Phytophthora capsici* (Naing *et al.*, 2014). The bacteria *Paenibacillus polymyxa* presents volatile components such as 1-Octen-3-ol, benzothiazole, citronellol and 1,3-dichloropropene, which severely inhibit mycelial growth and affect the spreading of fungal pathogens, and they show an interesting insecticidal and herbicidal activity (Zhao *et al.*, 2011). Likewise, the effect of *Streptomyces platensis* COVs on plant pathogenic fungi was reported in a study that identified antifungal compounds such as 2-phenylethanol and a derivative of felandren, substances responsible for the suppression of mycelial growth in *Rhizoctonia solani*, *Sclerotinia sclerotiorum* and *Botrytis cinerea* (Wan *et al.*, 2008). Also strains of *Bacillus subtilis* produce COVs that significantly limit mycelial growth, pigment production (inhibition of 43 to 93 % respectively) and control the germination of *Sclerotinia sclerotiorum* with alkynes, alcohols, esters, ketones, amines, phenols and heterocyclic compounds (Liu *et al.*, 2008). Microbial technologies based on sustainable principles that use agents with minimum environmental effects are the alternative and a perspective for the preservation of wood resources and its derivative.



(Pedraza, 2015). También, un importante número de cepas del género *Paenibacillus* pueden actuar como antagonistas de hongos fitopatógenos, por ejemplo, *P. ehimensis* KWN38 sintetiza butanol, el cual genera una inhibición (>50 %) en el desarrollo de hifas de los hongos *Rhizoctonia solani*, *Fusarium oxysporum* y del oomiceto *Phytophthora capsici* (Naing *et al.*, 2014). La bacteria *Paenibacillus polymyxa* presenta componentes volátiles como 1-Octen-3-ol, benzotiazol, citronelol y 1,3-dicloropropeno, los cuales inhiben severamente el crecimiento micelial y afectan la propagación de patógenos fúngicos, adicionalmente muestran una interesante actividad insecticida y herbicida (Zhao *et al.*, 2011). Asimismo, el efecto de COVs de *Streptomyces platensis* sobre hongos fitopatógenos se reportó. En dicho estudio se identificaron compuestos antifúngicos como 2-feniletanol y un derivado del felandreno, sustancias responsables de la supresión del crecimiento micelial en *Rhizoctonia solani*, *Sclerotinia sclerotiorum* y *Botrytis cinerea* (Wan *et al.*, 2008). También, cepas de *Bacillus subtilis* producen COVs que limitan significativamente el crecimiento micelial, producción de pigmentos (inhibición de 43 a 93 % respectivamente) y controlan la germinación de *Sclerotinia sclerotiorum*, por medio de alquinos, alcoholes, ésteres, cetonas, aminas, fenoles y compuestos heterocíclicos (Liu *et al.*, 2008). Tecnologías microbianas fundamentadas en principios sustentables que emplean agentes de mínima afectación ambiental son la alternativa y a la vez una perspectiva para la preservación de del recurso maderable y derivado.

### **Estrategias bacterianas para el control de hongos que deterioran la madera**

Las bacterias exhiben diversos mecanismos a través de los cuales pueden inhibir el desarrollo de microorganismos causantes del deterioro de la

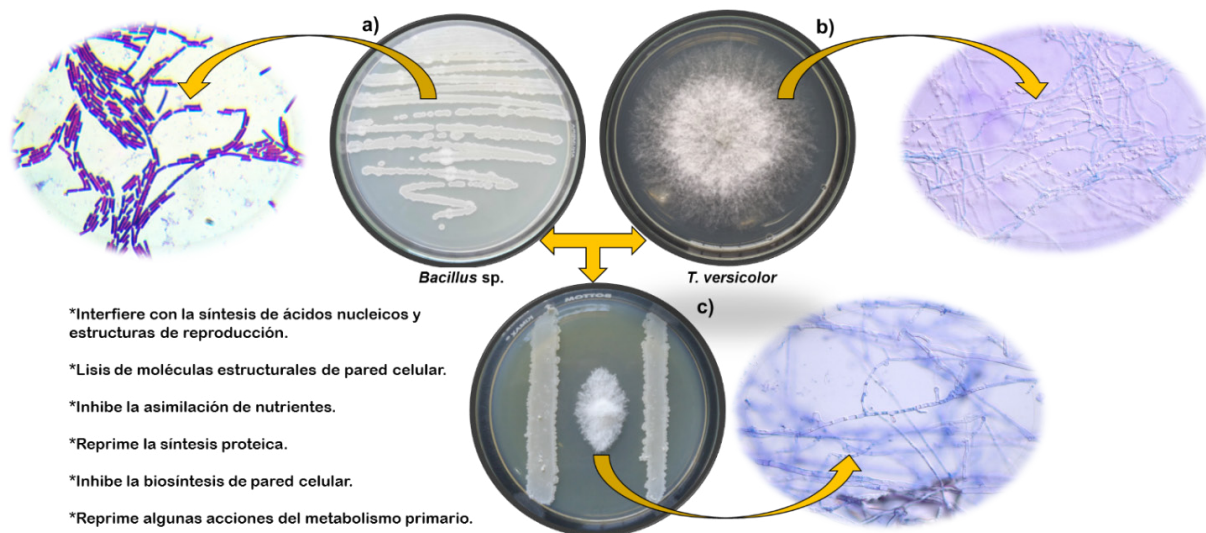
### **Bacterial strategies for the control of fungi that deteriorate wood**

Bacteria present diverse mechanisms through which they can inhibit the growth of microorganisms that cause the deterioration of wood and other forestry products (Zavattieri *et al.*, 2016; Cely *et al.*, 2016). Some of the bioactive metabolites may suppress fungal germination, spreading, or affect other activities of fungal development, such as invasive activity, the survival of fungal propagules embedded in clefts or the surface of wood to avoid their spreading (Figure 2). Most of these bacterial bioactives are catalogued in the group of antibiotics that inhibit the syntheses of the cell wall and of proteins, or alter the structure of the microbial membrane system, or cause the degradation of the genetic material of the target microorganism (Maksimov *et al.*, 2011). Some species of the genus *Bacillus* produce insecticidal antibiotics and proteins *e.g.* *B. subtilis* produce antibiotics, yet considered PGPRs, since they promote plant growth and a biological control over some soil pathogens. *B. thuringensis* produces proteins that affect the development of insects, and is therefore used as an insecticide. Both bacilli are an unexplored source of bioactives for the control of wood-decaying fungi.

Fungi require microelements for their development, and this need is vital, since these minerals can act as the pharmaceutical target or objective and make them unavailable to the fungus and allow its control. The molecular chelating of ions avoids their availability and therefore the assimilation by the fungus, therefore its development. This fungal control strategy can be carried out with the siderophores, that are compounds with low molecular weight, produced and secreted by plant roots and some bacteria, *e.g.* siderophores capture elements such as iron ( $Fe^{+3}$ )

madera y otros productos forestales (Zavattieri *et al.*, 2016; Cely *et al.*, 2016). Alguno de los metabolitos bioactivos bacterianos puede suprimir la germinación, propagación o afectar otras actividades del desarrollo fúngico, tales como la actividad invasora, la supervivencia de los propágulos fúngicos anidados en hendiduras o superficie de la madera para evitar su dispersión (Figura 2). La mayoría de estos bioactivos bacterianos están catalogados en el grupo de antibióticos que inhiben la síntesis de pared celular y la síntesis de proteínas o alterar la estructura del sistema membranal microbiano o provocar la degradación del material genético del microorganismo diana (Maksimov *et al.*, 2011). Algunas especies del género *Bacillus* producen antibióticos y proteínas insecticidas *e.g.* *B. subtilis* producen antibióticos, aunque consideradas PGPRs debido a que ejercen efecto promotor del crecimiento vegetal y un control biológico sobre

(Saha *et al.*, 2016). The best siderophore-producing bacteria are found in the bacterial category of PGPRs. Although siderophores are interesting, for the purpose of this investigation, it is shown as a recurring topic for its use in the protection of wood. The bacterial ability to produce siderophores calls to attention for the chelating of iron, since when it forms a siderophore  $Fe^3 +$  complex, and confining it in the bacterial cytosol with a specific receptor located in the bacterial membrane causes this micronutrient to become unavailable for microorganisms that lack the specific assimilation system and acknowledgement of such a complex (Radzki *et al.*, 2013; Tariq *et al.*, 2017). In this way, when using all or most of the soluble iron in the wood, fungal growth is suppressed, as well as in other microorganisms, as occurs in the rhizosphere (Bolívar-Anillo *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2017). The ability of siderophores to act



**Figura 2.** Modelo de inhibición de *Trametes versicolor* por la secreción de metabolitos de *Bacillus* sp. (a) el crecimiento del aislado bacteriano de *Bacillus* sp, (b) ejemplo del desarrollo del hongo fitopatogénico *T. versicolor* y (c) grado de inhibición de los metabolitos bacterianos sobre el crecimiento del fitopatogénico al estar en desarrollo simultáneo bajo condiciones *in vitro* a siete días de tiempo.

**Figure 2.** *Trametes versicolor* inhibition model for the secretion of *Bacillus* sp. metabolites (a) the growth of the *Bacillus* sp bacterial isolation, (b) example of the development of the phytopathogenic fungus *T. versicolor* and (c) degree of inhibition of the bacterial metabolites on the growth of the phytopathogen when in simultaneous development under *in vitro* conditions after seven days.

algunos patógenos del suelo. *B. thuringensis* produce proteínas que afectan el desarrollo de insectos por lo que se usa como insecticida. Ambos bacilos son una fuente de bioactivos inexplorada para el control de hongos deterioradores de la madera.

Los hongos requieren de microelementos para su desarrollo y esta necesidad es de vital importancia. En donde, estos minerales pueden actuar como el blanco o diana farmacológica al tornarlos no disponibles para el hongo y permitir su control. El secuestro molecular de iones evita su disponibilidad y por tanto la asimilación por el hongo y con ello se afecta su desarrollo. Esta estrategia de control fúngico se puede realizar mediante los sideróforos, que son compuestos de bajo peso molecular producidos y secretados por raíces vegetales y algunas bacterias, *e.g.* los sideróforos capturan elementos como el hierro ( $\text{Fe}^{+3}$ ) (Saha *et al.*, 2016). Las mejores bacterias productoras de sideróforos se encuentran en la categoría bacteriana de las PGPRs. Aunque, los sideróforos son interesantes, por el propósito de este trabajo se muestra como un tema recurrente para su aplicación en la protección de la madera. La capacidad bacteriana de producir sideróforos llama la atención para el secuestro del hierro ya que al formar un complejo  $\text{Fe}^3 +$  sideróforo, e internarlo al citosol bacteriano mediante un receptor específico localizado en la membrana bacteriana, ocasiona que este micronutriente no esté disponible para microorganismos que carezcan del sistema de asimilación específico y reconocimiento de dicho complejo (Radzki *et al.*, 2013; Tariq *et al.*, 2017). De tal manera que al utilizar la totalidad o mayoría del hierro soluble en la madera se suprime el crecimiento fúngico y de otros microorganismos, tal como ocurre en la rizósfera (Bolívar-Anillo *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2017). La capacidad de los sideróforos para actuar como supresores de hongos deterioradores de la madera se desconoce y es

as suppressors of wood deteriorating fungi is unknown and its deleterious action may depend on chemical, physical and biological factors, as in the Rhizosphere (Saha *et al.*, 2016). However this is one of the challenges to overcome and that may be important in the preservation of this material. Another unexplored field in wood preservation and in the control of its biodeterioration are the lytic enzymes of polymers from fungal cell walls. These enzymes are produced by diverse microorganisms, including PGPRs, in which there have been descriptions of glucanases, proteases and chitinases. These act with the degradation of the polymers that make up the fungal cell wall of wood deteriorators, as described that takes place in pathogenic fungi (El-Tarabily and Sivasithamparam, 2006). Some of the main PGPRs that produce these enzymes are *Bacillus altitudinis* and *B. amyloliquefaciens* (Sunar *et al.*, 2013; Tariq *et al.*, 2017). As a natural renewable but definitely finite resource, wood is of great economic importance worldwide. A challenge in its preservation is to have strategies based on the microbial exudates to avoid the use of toxic substances in its control.

## CONCLUSIONS

Bacterial metabolites such as dimethylhexadecylamine, 2,4-Di-tert-butylphenol or of an antibiotic nature are potentially an alternative to conventional preservatives of low durability wood. But there is still a lack of knowledge in terms of production, use and doses of the microbial exudates. Therefore, the challenge is to attain high yields and reliability of these secondary metabolites comparable to the conventional preservatives using biotechnology strategies that include microbiological components

posible que su acción deletérea dependa de factores químicos, físicos y biológicos como ocurre en la rizósfera (Saha *et al.*, 2016). Sin embargo, este es uno de los retos a superar y que puede ser importante en la preservación de este material. Otro campo inexplorado en la preservación de la madera y en el control de su biodeterioro son las enzimas líticas de polímeros de pared celular fúngica. Enzimas que diversos microorganismos las producen entre los que se encuentran las PGPRs, en quienes se han descrito las glucanasas, proteasas y quitinasas. Estas actúan mediante la degradación de los polímeros que componen la pared celular fúngica de los deterioradores de la madera, al igual como se describió que ocurre en hongos fitopatógenos (El-Tarabily y Sivasithamparam, 2006). Entre las principales PGPRs productoras de estas enzimas destacan *Bacillus altitudinis* y *B. amyloliquefaciens* (Sunar *et al.*, 2013; Tariq *et al.*, 2017). Como recurso natural renovable pero definitivamente agotable, la madera es de importancia económica a nivel mundial. Un reto en el área de su preservación es tener estrategias basadas en los exudados microbianos para evitar el uso de sustancias tóxicas en su manejo.

## CONCLUSIONES

Metabolitos bacterianos como la dimetilhexadecilamina, 2,4-Di-ter-butilfenol o de naturaleza antibiótica potencialmente son una alternativa a los preservadores convencionales de la madera de baja durabilidad. Pero aún, un desconocimiento existe en cuanto a la producción, modo de empleo y dosificación de los exudados microbianos. Por lo tanto, el reto es alcanzar rendimientos y confiabilidad de estos metabolitos secundarios comparable con los preservadores convencionales mediante estrategias biotecnológicas que incluyen componentes microbiológicos.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the UMSNH for funding this investigation.

~~~~~ End of the English version ~~~~~

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la UMSNH por el financiamiento a esta investigación.

## LITERATURA CITADA

- Agboton C, Onzo A, Korie S, Tamò M and Vidal S. 2017. Spatial and temporal infestation rates of *Apate terebrans* (Coleoptera: Bostrichidae) in cashew orchards in Benin, West Africa. *African Entomology* 25(1):24-36. <https://doi.org/10.4001/003.025.0024>
- Ahmad F, Ahmad I and Khan MS. 2008. Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities. *Microbiological Research* 163:173-181. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2006.04.001>
- Arbelo A y Garbuyo E. 2012. Patologías en la construcción en madera. Estudio de caso: vivienda Punta Colorada. Disponible en línea: <https://www.colibri.udelar.edu.uy/bitstream/123456789/1884/5/ARB6.pdf>
- Ariza Y y Sánchez L. 2012. Determinación de metabolitos secundarios a partir de *Bacillus subtilis* efecto biocontrolador sobre *Fusarium* sp. *Nova* 10:149-155. Disponible en línea: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1794-24702012000200002&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702012000200002&lng=en&tlng=es)
- A.S.T.M D-2017-81. American Society for Testing and Materials. (ASTM). 1994. D-2017-81: Standard Method of Accelerated Laboratory Natural Decay Resistance for Woods. *Annual Book of ASTM Standard*, Philadelphia, v. 410, p. 324-328. Disponible en línea: <https://www.astm.org/Standard/standards-and-publications.html>
- Auffan M, Masion A, Labille J, Diot MA, Liu W, Olivi L, Proux O, Ziarelli F, Chaurand P, Geantef C, Bottero JY and Rose J. 2014. Long-term aging of a CeO<sub>2</sub> based nanocomposite used for wood protection. *Environmental Pollution* 188:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.01.016>
- AWPA P5-83 1983. American Wood-Preserver's Association (AWPA). 1983. P5-83. Standard for waterborne preservatives. In: *American Wood Preservers' Association AWPA*. Pp. 1-4
- Berocal JA. 2007. Clasificación de daños producidos por agentes de biodeterioro en la madera. *Revista Forestal*

- Mesoamericana Kurú 4:54-62. Disponible en línea: <http://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/500/427>
- Bobadilla EA, Pereyra O, Silva F y Stehr AM. 2005. Durabilidad natural de la madera de dos especies aptas para la industria de la construcción. *Floresta* 35:419-428. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v35i3.5192>
- Bolívar-Anillo HJ, Contreras-Zentella ML y Teherán-Sierra LG. 2016. *Burkholderia tropica* una bacteria con gran potencial para su uso en la agricultura. *TIP* 19:102-108. <https://doi.org/10.1016/j.recqb.2016.06.003>
- Carrillo-Parra A, Hapla F, Mai C y Garza-Ocañas F. 2011. Durabilidad de la madera de *Prosopis laevigata* y efecto de sus extractos en hongos que degradan la madera. *Madera y bosques* 17:7-21. Disponible en línea: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S140504712011000100001&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140504712011000100001&lng=es&tlng=en)
- Cely MV, Siviero MA, Emiliano J, Spago FR, Freitas VF, Barazetti AR, Goya ET, de Souza Lambertini, G, dos Santos IM, De Oliveira AG and Andrade G. 2016. Inoculation of *Schizolobium parahyba* with Mycorrhizal Fungi and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Increases Wood Yield under Field Conditions. *Frontiers in Plant Science* 7:1-13. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2016.01708>
- Cheng SS, Liu JY, Hsui YR and Chang ST. 2006. Chemical polymorphism and antifungal activity of essential oils from leaves of different provenances of indigenous cinnamon (*Cinnamomum osmophloeum*). *Bioresource Technology* 97:306-312. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2005.02.030>
- Damian BLM, Martínez MRE, Salgado GR y Martínez PMM. 2010. *In vitro* antioomycete activity of *Artemisia ludoviciana* extracts against *Phytophthora*. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas* 9:136-142. ISSN:0717-7917. Disponible en línea: <http://www.redalyc.org/html/856/85612475009/>
- El-Tarabily KA and Sivasithamparam K. 2006. Non-streptomycete actinomycetes as biocontrol agents of soil-borne fungal plant pathogens and as plant growth promoters. *Soil Biology and Biochemistry* 38:1505-1520. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.12.017>
- FAO 2007. Food and Agriculture Organization of the United Nations. State of the world's forests. Rome, Italy: FAO Forestry Department.
- Findlay WPK. 1951. The value of laboratory test on wood preservatives. [S.l.]: Convention British Wood Preserving Association.
- Flower CE and Gonzalez-Meler MA. 2015. Responses of temperate forest productivity to insect and pathogen disturbances. *Annual Review of Plant Biology* 66:547-569. Disponible en línea: <http://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-arplant-043014-115540>
- Freeman MH, Shupe TF, Vlosky RP and Barnes HM. 2003. Past, present, and future of the wood preservation industry: wood is a renewable natural resource that typically is preservative treated to ensure structural integrity in many exterior applications. *Forest Products Journal* 53(10):8-16. Disponible en línea: <http://go.galegroup.com/ps/i.do?id=GALE%7CA110822270&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=fulltext&issn=00157473&p=AONE&sw=w&authCount=1&u=umsnh1&selfRedirect=true>
- González-Laredo RF, Rosales-Castro M, Rocha-Guzmán NE, Gallegos-Infante JA, Moreno-Jiménez MR y Karchesy JJ. 2015. Wood preservation using natural products. *Madera y Bosques* 21:63-76. <http://dx.doi.org/10.21829/myb.2015.210427>
- Guillén F, Martínez MJ, Gutiérrez A and Del Río JC. 2005. Biodegradation of lignocellulosics: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. *International Microbiology* 8:195-204. Disponible en línea: <http://scielo.isciii.es/pdf/im/v8n3/07%20Martinez.pdf>
- Gutiérrez-Mañero FJ, Ramos-Solano B, Probanza A, Mehouchi J, Tadeo F and Talon M. 2001. The plant-growth-promoting rhizobacteria *Bacillus pumilus* and *Bacilluslicheniformis* produce high amounts of physiologically active gibberellins. *Physiologia Plantarum* 111:206-211. <http://dx.doi.org/10.1034/j.1399-3054.2001.1110211.x>
- Haas D and Défago G. 2005. Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads. *Nature Reviews Microbiology* 3:307-319. <http://dx.doi.org/10.1038/nrmi-0129>
- Ibáñez OC, Mantero C, Rabinovich M, Cecchetto G y Cerdeiras P. 2012. Deterioro y preservación de madera. *Revista Digital Universitaria* 13(5):1-15 Disponible en línea: <http://www.revista.unam.mx/vol.13/num5/art55/index.html>
- Kartal SN, Yoshimura T and Imamura Y. 2009. Modification of wood with Si compounds to limit boron leaching from treated wood and to increase termite and decay resistance. *International Biodeterioration and Biodegradation* 63:187-190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.08.006>
- Konradsen F, van der Hoek W, Cole DC, Hutchinson G, Daisley H, Singh S and Eddleston M. 2003. Reducing acute poisoning in developing countries-options for restricting the availability of pesticides. *Toxicology* 192(2):249-261. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(03\)00339-1](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(03)00339-1)
- Kumar H, Dubey RC and Maheshwari DK. 2017. Seed-coating fenugreek with *Burkholderia* rhizobacteria enhances yield in field trials and can combat Fusarium wilt. *Rhizosphere* 3:92-99. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2017.01.004>
- Kumar P, Dubey RC and Maheshwari DK. 2012. *Bacillus* strains isolated from rhizosphere showed plant growth promoting and antagonistic activity against phytopathogens. *Microbiological Research* 167:493-499. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micres.2012.05.002>
- Lebow S, Arango R, Woodward B, Lebow P and Ohno K. 2015. Efficacy of alternatives to zinc naphthenate for dip treatment of wood packaging materials. *International Biodeterioration and Biodegradation* 104:371-376. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.07.006>
- Liu C, Sheng J, Chen L, Zheng Y, Lee DYW, Yang Y, Xu M and Shen L. 2015. Biocontrol activity of *Bacillus subtilis* isolated from *Agaricus bisporus* mushroom compost against pathogenic fungi. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 63(26):6009-6018. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b02218>
- Liu W, Mu W, Zhu B and Liu F. 2008. Antifungal activities and components of VOCs produced by *Bacillus subtilis* G8. *Current Research on Bacteriology* 1:28-34. Disponible en línea: <http://www.docsdrive.com/pdfs/ansinet/crb/2008/28-34.pdf>

- Maksimov IV, Abizgil' Dina RR and Pusenkova LI. 2011. Plant growth promoting rhizobacteria as alternative to chemical crop protectors from pathogens (review). *Applied Biochemistry and Microbiology* 47:333-345. <http://dx.doi.org/10.1134/S0003683811040090>
- Manual del grupo andino para la preservación de maderas. 1988. Ed. Proyecto subregional de promoción industrial de la madera para construcción de la Junta del Acuerdo de Cartagena L.
- Martínez PMM, del Río RE, Flores GA, Martínez MRE, Ron Echeverría OA and Raya GD. 2012. *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb: The biotechnological profile of a tropical tree. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas* 11:385-399. Disponible en línea: <http://www.redalyc.org/pdf/856/85624131001.pdf>
- Matan N and Matan N. 2008. Antifungal activities of anise oil, lime oil, and tangerine oil against molds on rubberwood (*Hevea brasiliensis*). *International Biodeterioration and Biodegradation* 62:75-78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2007.07.014>
- Moglia JG, Amórtegui IC y Giménez AM. 2015. Ocurrencia de la mancha roja en el leño de *Aspidosperma quebrachoblanco*. *Revista de Ciencias Forestales* 23:1-2. Disponible en línea: <http://www.redalyc.org/pdf/481/48145593003.pdf>
- Naing KW, Anees M, Kim SJ, Nam Y, Kim YC and Kim KY. 2014. Characterization of antifungal activity of *Paenibacillus ehimensis* KWN38 against soilborne phytopathogenic fungi belonging to various taxonomic groups. *Annals of Microbiolog* 64:55-63. <http://dx.doi.org/10.1007/s13213-013-006>
- Nascimento MS, Santana ALBD, Maranhão CA, Oliveira LS and Bieber L. 2013. Phenolic extractives and natural resistance of wood. Pp:349-370. In *Biodegradation-Life of Science*. <http://dx.doi.org/10.5772/56358>
- NMX-C-222-1983. Norma Mexicana. "Industria de la Construcción-Vivienda de Madera Prevención de Ataque por Termitas-Especificaciones".
- NMX-C-239-1985. Norma Mexicana para la "Calificación y clasificación de la madera de pino para uso estructural".
- Orozco-Mosqueda M, Valencia-Cantero E, López-Albarrán P, Martínez-Pacheco M y Velázquez-Becerra C. 2015. La bacteria *Arthrobacter agilis* UMCV2 y diversas aminas inhiben el crecimiento *in vitro* de hongos destructores de madera. *Revista Argentina de Microbiología* 47:219-228. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ram.2015.06.005>
- Patel N, Oudemans PV, Hillman BI and Kobayashi DY. 2013. Use of the tetrazolium salt MTT to measure cell viability effects of the bacterial antagonist *Lysobacter enzymogenes* on the filamentous fungus *Cryphonectria parasitica*. *Antonie Van Leeuwenhoek* 103(6):1271-1280. <https://doi.org/10.1007/s10482-013-9907-3>
- Pedraza RO. 2015. Siderophores production by *Azospirillum*: biological importance, assessing methods and biocontrol activity. In *Handbook for Azospirillum*. Pp. 251-262. Springer International Publishing. 514p. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-06542-7\\_14](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-06542-7_14)
- Radzki W, Mañero FG, Algar E, García JL, García-Villaraco A and Solano BR. 2013. Bacterial siderophores efficiently provide iron to iron-starved tomato plants in hydroponics culture. *Antonie Van Leeuwenhoek* 104(3):321-330. <https://doi.org/10.1007/s10482-013-9954-9>
- Ramírez-López CB, García-Sánchez E, Martínez-Muñoz RE, Del Río RE y Martínez-Pacheco MM. 2016. Chemical composition of the essential oil from *Ageratina jocotepecana* and its repellent effect on drywood termite *Incisitermes marginipennis*. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*. 15(1):53-60. Disponible en línea: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85643330005>
- Raya-González D, Martínez-Muñoz RE, Ron-Echeverría OA, Flores-García A, Macías-Rodríguez LI and Martínez-Pacheco MM. 2013. Dissuasive effect of an extract aqueous from *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq) Griseb on the drywood termite *Incisitermes marginipennis* (Isoptera:Kalotermitidae) (Latreille). *EJFA* 25:524-530. <http://dx.doi.org/10.9755/ejfa.v25i7.15987>
- Saha M, Sarkar S, Sarkar B, Sharma B K, Bhattacharjee S and Tribedi P. 2016. Microbial siderophores and their potential applications: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 23(5):3984-3999. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4294-0>
- Schmidt O. 2007. Indoor wood-decay basidiomycetes: damage, causal fungi, physiology, identification and characterization, prevention and control. *Mycological Progress* 6:261-279. <http://dx.doi.org/10.1007/s11557-007-0534-0>
- Schwarze FWMR. 2007. Wood decay under the microscope. *Fungal Biology Reviews* 21(4):133-170. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2007.09.001>
- Singh AP and Singh T. 2014. Biotechnological applications of wood-rotting fungi: A review. *Biomass and Bioenergy* 62:198-206. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.12.013>
- Singh AP, Kim YS and Singh T. 2016. Bacterial degradation of wood. *Secondary Xylem Biology: Origins, Functions, and Applications* 9:169-190. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802185-9.00009-7>
- Singh T and Singh AP. 2012. A review on natural products as wood protectant. *Wood Science and Technology* 46:851-870. <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-011-0448-5>
- Sivasakthi S, Usharani G and Saranraj P. 2014. Biocontrol potentiality of plant growth promoting bacteria (PGPR)-*Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus subtilis*: A review. *African Journal of Agricultural Research* 9(16):1265-1277. <https://dx.doi.org/10.5897/AJAR2013.7914>
- Stirling R, Daniels CR, Clark JE and Morris PI. 2007. Methods for determining the role of extractives in the natural durability of western red cedar. *International Research Group on Wood Protection*. Doc No. IRG-WP 07e20356.
- Stork NE, McBroom J, Gely C and Hamilton AJ. 2015. New approaches narrow global species estimates for beetles, insects, and terrestrial arthropods. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112(24):7519-7523. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1502408112>
- Subramanian J, Ramesh T and Kalaiselvam M. 2014. Fungal laccases-properties and applications: a review. *International Journal of Pharmaceutical and Biological Archive* 5(2):8-16. Disponible en línea: <http://www.ijpba.info/ijpba/index.php/ijpba/article/viewFile/1237/881>

- Sunar K, Dey P, Chakraborty U and Chakraborty B. 2013. Biocontrol efficacy and plant growth promoting activity of *Bacillus altitudinis* isolated from Darjeeling hills, India. *Journal of Basic Microbiology* 55:91-104. <http://dx.doi.org/10.1002/jobm.201300227>
- Tariq M, Noman M, Ahmed T, Hameed A, Manzoor N and Zafar M. 2017. Antagonistic features displayed by Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): A Review. *Journal of Plant Science and Phytopathology* 1:38-43. Disponible en línea: <https://www.heighpubs.org/jpsp/pdf/jpsp-aid1004.pdf>
- Tascioglu C, Yalcin M, de Troya T y Sivrikaya H. 2012. Termiticidal properties of some wood and bark extracts used as wood preservatives. *BioResources* 7:2960-2969. Disponible en línea: [http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes\\_07\\_3\\_2960\\_Tascioglu\\_YTS\\_Termiticidal\\_Wood\\_Bark\\_Extracts](http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_07_3_2960_Tascioglu_YTS_Termiticidal_Wood_Bark_Extracts)
- Tascioglu C, Yalcin M, Sen S and Akcay C. 2013. Antifungal properties of some plant extracts used as wood preservatives. *International Biodeterioration and Biodegradation* 85:23-28. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.06.004>
- Tejera B, Heydrich M y Rojas MM. 2012. Antagonismo de *Bacillus* spp. frente a hongos fitopatógenos del cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.). *Revista de Protección Vegetal* 27:117-122. Disponible en línea: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1010-27522012000200008](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-27522012000200008)
- Ulyshen MD. 2015. Insect-mediated nitrogen dynamics in decomposing wood. *Ecological Entomology* 40:97-112. <https://doi.org/10.1111/een.12176>
- Velázquez-Becerra C, Macías-Rodríguez LI, López-Bucio J, Flores-Cortez I, Santoyo G, Hernández-Soberano C and Valencia-Cantero E. 2013. The rhizobacterium *Arthrobacter agilis* produces dimethylhexadecylamine, a compound that inhibits growth of phytopathogenic fungi *in vitro*. *Protoplasma* 25:1251-1262. <http://dx.doi.org/10.1007/s00709-013-0506-y>
- Veronovski N, Verhovšek D and Godnjavec J. 2013. The influence of surface-treated nano-TiO<sub>2</sub> (rutile) incorporation in water-based acrylic coatings on wood protection. *Wood science and technology* 47(2):317-328. <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-012-0498-3>
- Wan M, Li G, Zhang J, Jiang D and Huang HC. 2008. Effect of volatile substances of *Streptomyces platensis* F-1 on control of plant fungal diseases. *Biological Control* 46:552-559. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.05.015>
- Widmer TL. 2014. Screening *Trichoderma* species for biological control activity against *Phytophthora ramorum* in soil. *Biological Control* 79:43-48. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.08.003>
- Yang VW and Clausen CA. 2007. Antifungal effect of essential oils on southern yellow pine. *International Biodeterioration and Biodegradation* 59:302-306. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2006.09.004>
- Zanni E. 2004. Patología de madera. Degradación y Rehabilitación de Estructuras de Madera. Primera Edición. Editorial Brujas. Córdoba, Argentina. 244p.
- Zanni E. 2008. Patología de la construcción y restauración de obras de arquitectura. Primera Edición. Editorial Brujas. Córdoba, Argentina. 300p.
- Zavattieri MA, Ragonezi C and Klimaszevska K. 2016. Adventitious rooting of conifers: influence of biological factors. *Trees* 30(4):1021-1032. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1412-7>
- Zhao LJ, Yang XN, Li XY, Wei MU and Feng LIU. 2011. Antifungal, insecticidal and herbicidal properties of volatile components from *Paenibacillus polymyxa* strain BMP-11. *Agricultural Sciences in China* 10:728-736. [http://dx.doi.org/10.1016/S1671-2927\(11\)60056-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1671-2927(11)60056-4)
- Zou CS, Mo MH, Gu YQ, Zhou JP and Zhang KQ. 2007. Possible contributions of volatile-producing bacteria to soil fungistasis. *Soil Biology and Biochemistry* 39:2371-2379. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.04.009>