



FRONTERA BIOTECNOLÓGICA

NO ESTABAN MUERTAS, ANDABAN DE PARRANDA: EL FENÓMENO DE RESURRECCIÓN EN LAS PLANTAS, SU POSIBLE ORIGEN Y DEVENIR NATURAL

BIOTECNOLOGÍA FUNGAL APLICADA A LA DEGRADACIÓN DE XENOBIÓTICOS: ENZIMAS PEROXIDASAS Y SU POTENCIAL EN BIORREMEDIACIÓN

EVALUACIÓN DEL USO DE COMPOSTAS SOBRE EL CULTIVO DE LECHUGA

HONGOS DE PUDRICIÓN BLANCA COMO BIOTECNOLOGÍA EMERGENTE PARA COMBATIR AFLATOXINAS

Directorio Institucional

IPN

ENRIQUE FERNÁNDEZ FASSNACHT
Director General

JULIO GREGORIO MENDOZA ÁLVAREZ
Secretario General

MIGUEL ÁNGEL ÁLVAREZ GÓMEZ
Secretario Académico

JOSÉ GUADALUPE TRUJILLO FERRARA
Secretario de Investigación y Posgrado

FRANCISCO JOSÉ PLATA OLVERA
Secretario de Extensión e Integración Social

MÓNICA ROCÍO TORRES LEÓN
Secretaria de Servicios Educativos

PRIMO ALBERTO CALVA CHAVARRÍA
Secretario de Gestión Estratégica

FRANCISCO JAVIER ANAYA TORRES
Secretario de Administración

EMMANUEL ALEJANDRO MERCHÁN CRUZ
Secretario Ejecutivo de la Comisión de Operación
y Fomento de Actividades Académicas

JOSÉ LUIS AUSENCIO FLORES RUIZ
Secretario Ejecutivo del Patronato de Obras e
Instalaciones

DAVID CUEVAS GARCÍA
Abogado General

JESÚS ÁVILA GALINZOGA
Presidente del Decanato

CIBA IPN

MYRNA SOLÍS OBA
Directora del CIBA IPN Tlaxcala

RAÚL JACOBO DELGADO MACUIL
Subdirector Académico y de Investigación del CIBA IPN
Tlaxcala

ERIK OCARANZA SÁNCHEZ
Subdirector de Vinculación del CIBA IPN Tlaxcala

ABDU ORDUÑA DIAZ
Subdirector de Innovación Tecnológica
del CIBA IPN Tlaxcala

DAVID GUILLERMO PÉREZ ISHIWARA
Miembro Fundador de Frontera Biotecnológica

MARTHA BIBBINS MARTINEZ
Editor en Jefe

GONZALO PÉREZ ARAIZA
Soporte Técnico

PEDRO RAMÍREZ CALVA
Diseño y Diagramación Frontera Biotecnológica

ISMAEL SÁNCHEZ GONZÁLEZ
Desarrollo Web

CONTENIDO

MENSAJE EDITORIAL 3

NO ESTABAN MUERTAS, ANDABAN
DE PARRANDA: EL FENÓMENO DE
RESURRECCIÓN EN LAS PLANTAS, SU
POSIBLE ORIGEN Y DEVENIR NATURAL 4

BIOTECNOLOGÍA FUNGAL APLICADA A
LA DEGRADACIÓN DE XENOBIÓTICOS:
ENZIMAS PEROXIDASAS Y SU POTENCIAL
EN BIORREMEDIACIÓN 11

EVALUACIÓN DEL USO DE COMPOSTAS
SOBRE EL CULTIVO DE LECHUGA 15

HONGOS DE PUDRICIÓN BLANCA
COMO BIOTECNOLOGÍA EMERGENTE
PARA COMBATIR AFLATOXINAS 21

CINTILLO LEGAL

FRONTERA BIOTECNOLÓGICA, año 5, número 6, enero - abril 2017, es una publicación cuatrimestral editada por el Instituto Politécnico Nacional a través del Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal Tecuexcomac - Tepetitla Km 1.5, Tlaxcala C.P. 90700, México. Tels.: 01-248-48707-65 y 66 Conmutador IPN: 57296000, Ext. 87816. <http://www.revistafronterabiotecnologica.cibatlaxcala.ipn.mx>, Editor responsable: Dra. Martha Dolores Bibbins Martínez. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título No. 04-2015-120313501700-203, ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsable de la última actualización de este número, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Dra. Martha Dolores Bibbins Martínez., Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal Tecuexcomac - Tepetitla Km 1.5, Tlaxcala C.P. 90700, fecha de última modificación, 27 de abril de 2017.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Instituto Politécnico Nacional.

MENSAJE EDITORIAL

Abril del 2017

Estimados lectores;

En nuestra primera edición de FRONTERA BIOTECNOLÓGICA de este año, conoceremos sobre organismos dotados de capacidades extraordinarias.

En primer lugar, LAS PLANTAS DE RESURRECCIÓN (PDR). Tras meses de sequía en los que aparentemente quedan secas y sin vida, estas plantas tienen la capacidad única de revivir con las primeras lluvias, fascinante!! no es así?. Dadas las actuales condiciones ambientales, los periodos de sequía y las superficies áridas no cultivables, están aumentando, lo cual representa un grave problema en la producción agrícola y por ende en la seguridad alimentaria. Por lo anterior, el estudio de este tipo de plantas es muy importante para poder contar con novedosas variedades agrícolas tolerantes, en ciertos rangos, a la escasez de agua.

En segundo lugar, LOS HONGOS DE PUDRICIÓN BLANCA, organismos que pueden degradar compuestos recalcitrantes y altamente peligrosos como diversos contaminantes ambientales y micotoxinas. Esta capacidad de los hongos es definida por un sistema enzimático no específico constituido principalmente por oxidasas. Las enzimas oxidasas se han utilizado en diversas áreas de la biotecnología, una de las ramas en las que más sobresalen es en el ámbito de la biorremediación. Por otra parte, el empleo de tales enzimas en agricultura o en alimentos, para la descontaminación de toxinas fúngicas como las aflatoxinas, moléculas altamente tóxicas y carcinogénicas, es prometedor, debido a que los productos que generan no son tóxicos en comparación a los generados con otro tipo de tratamientos.

Y finalmente, todo un ejército de diferentes organismos trabajando en conjunto para convertir un desecho orgánico en un fertilizante agrícola a través de un proceso que se denomina COMPOSTAJE. El proceso de compostaje se define como un sistema biooxidativo controlado de tratamiento/estabilización de residuos orgánicos heterogéneos en estado sólido. Debido a la actividad secuencial de una gran diversidad de microorganismos, se obtiene un producto que puede utilizarse como abono, enmienda o sustrato. Este tipo de procesos es muy importante ya que la gestión de los residuos se ha convertido en uno de los problemas más importantes de nuestra sociedad y por otra parte, el uso de fertilizantes químicos en agricultura, ha provocado gran daño a los suelos, repercutiendo en una menor producción agrícola.

Con las temáticas abordadas en este número de FRONTERA BIOTECNOLÓGICA se vuelve a resaltar la importancia de la BIOTECNOLOGÍA para resolver o atender problemáticas de gran impacto en nuestra actualidad.

Los invitamos a leer y a compartir con otros investigadores, estudiantes, trabajadores y público en general, esta edición tan interesante de FRONTERA BIOTECNOLÓGICA.

“LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA”.

DRA. MARTHA BIBBINS MARTÍNEZ
Editor en jefe

NO ESTABAN MUERTAS, ANDABAN DE PARRANDA: EL FENÓMENO DE RESURRECCIÓN EN LAS PLANTAS, SU POSIBLE ORIGEN Y DEVENIR NATURAL

Aldo Francisco Sánchez Pérez¹, Analilia Arroyo Becerra², Miguel Ángel Villalobos López²

¹ Bachillerato General Oficial “Manuel Ávila Camacho” Camino a San Martín S/N, Tuxtla, Zapotitlán de Méndez, Puebla C.P. 73440, México

² Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada (IPN-CIBA) - Tlaxcala, Ex-Hacienda San Juan Molino, Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla Km 1.5, Tlaxcala C.P. 90700, México
Correos electrónicos: bindejenseits@gmail.com, alarroyo@ipn.mx, mvillalobosl@ipn.mx

RESUMEN

Dentro del Reino Vegetal existe un grupo de organismos con una capacidad asombrosa para tolerar la falta de agua, al cual pertenecen las llamadas plantas de resurrección (PDR) o anhidrobias. Las PDR están altamente especializadas para contender con la sequía y/o deshidratación, y pueden recuperar rápidamente sus funciones fisiológicas normales aún después de haber perdido hasta el 90% del total de su agua protoplasmática. Dadas las actuales condiciones ambientales y socioeconómicas en el mundo, se requerirá agotar todas las alternativas tecnológicas para que en las próximas dos décadas podamos duplicar la producción de alimentos sin degenerar el ambiente. De ahí que las PDR constituyen excelentes modelos de estudio con enorme potencial científico y biotecnológico para el descubrimiento de nuevos metabolitos, genes, mecanismos bioquímicos y fisiológicos que regulan las respuestas a la desecación, lo que posibilita la generación de novedosas variedades agrícolas tolerantes, en ciertos rangos, a la escasez de agua.

Palabras clave: Plantas de Resurrección, Tolerancia a la desecación

ABSTRACT

Within the Plant Kingdom exists a group of organisms with an astonishing capacity to tolerate the lack of water, which belongs to the so-called resurrection plants (PDR) or anhydrobias. PDRs are highly specialized to cope with drought and/or dehydration, and can rapidly recover their normal physiological functions even after losing up to 90% of their total protoplasmatic water. Given the current environmental and socio-economic conditions prevailing in the world, it will be necessary to exhaust all the technological alternatives so that in the next two decades we can double food production without degenerating the environment. This is why PDRs are excellent study models with enormous scientific and biotechnological potential for the discovery of new metabolites, genes, biochemical and physiological mechanisms that regulate responses to desiccation, which makes possible the generation of novel agricultural varieties tolerant, in certain ranges, to water scarcity.

Key words: Resurrection plants, Desiccation tolerance

INTRODUCCIÓN

Cualquier ser humano puede reconocer y admirarse con la gran variedad de *formas vivas* que se han venido desarrollando a lo largo de millones de años en los diferentes Dominios. El Reino Vegetal puede concebirse como un vasto mar de diseños, que se entrelazan con el resto de los organismos en un majestuoso orden natural. Plantas minúsculas y ancestrales, hermosos especímenes que iluminan las facciones de aquel que se acerca a sus bellas flores o imponentes árboles que parecen rozar las nubes y que inminentemente están en contacto con energías más sutiles y pulcras, son ejemplos del devenir evolutivo que acarrea nuevos seres, más *funcionales*, más complejos.

Una escueta hojeada a *Historia plantarum generalis*, obra del naturalista inglés John Ray, expone el vivaz interés del hombre por sus congéneres vegetales y la gran cantidad de información que se tenía sobre ellos en la Europa del siglo XVII (sólo por mencionar un ejemplo en extremo particular). Y es precisamente el conocimiento sobre estos seres lo que ha promovido una mejora, o dicho de otro modo, “nuevas posibilidades” en el *modus vivendi* humano, ya sea como placer, como progreso económico-político, e incluso como destello espiritual.

Como un grupo muy peculiar del Reino Vegetal se encuentran las sorprendentes Plantas **Anhidrobias**, organismos capaces de tolerar pérdidas abrumadoras de agua y que pueden recuperarse de pérdidas que oscilan entre el 80 y 90% del total de su agua **protoplasmática** (Oliver *et al.*, 2000); en otras palabras, pueden soportar niveles netos de agua de 0.1 g de H₂O/g (Moore *et al.*, 2008), condición de déficit de agua que es letal para la basta mayoría de plantas con flores. A dichos organismos también se les conoce con el nombre de **Plantas de Resurrección (PDR) o Plantas Tolerantes a la Desecación (PTD)**. Cabe distinguir esta estrategia (tolerancia a la desecación) para contender con ambientes extremadamente secos, de otras estrategias, como son el escape y la evasión (confundida con frecuencia con el término resistencia). En el caso del escape, algunas plantas anuales completan sus ciclos de vida durante la etapa del año abundante

en disponibilidad de agua y condiciones de crecimiento favorables, evitando así exponerse a la falta de agua; ejemplo de ellas son las plantas efímeras del desierto. Otras especies vegetales, en general perenes como lo son los cactus, han desarrollado estructuras por demás exóticas que les permiten capturar y retener enormes cantidades de agua y evadir su pérdida (raíces largas, tejidos suculentos, cutícula cerosa, espinas en lugar de hojas), lo que las ha llevado a extender su conquista a una mayor variedad de hábitats (Levitt, 1980).

Es interesante que uno de los primeros reportes concernientes al fenómeno de resurrección estuvo desligado de las plantas. Se dio en una sesión de la *Royal Society* (la primera sociedad científica inglesa), en 1743, cuando Sir Henry Baker anunció el descubrimiento de algunos animales que podían deshidratarse hasta alcanzar un equilibrio con el aire y una vez que se les suministraba el agua necesaria, podían regresar a sus funciones habituales. Aunque por demás poético, este argumento es cierto, ya que en la naturaleza es posible encontrar animales, como tartígrados, rotíferos y nemátodos, capaces de soportar largos periodos de sequía en estado de latencia (Alpert, 2006).

I. BREVE INFORMACIÓN EVOLUTIVA.

De acuerdo con estudios enfocados a develar el origen y la evolución temprana de las plantas terrestres, se considera que los ancestros de las PDR estaban ligados completamente al medio acuático (Algas Verdes de la Clase Charophyceae), por lo tanto, es lógico pensar que la capacidad de tolerar la desecación fue una particularidad que propició la construcción de nuevos nichos en el medio terrestre (Graham *et al.*, 2000). Dicha característica aún puede observarse en estructuras reproductivas como esporas, semillas y polen, y hasta cierto punto puede considerarse común en muchas especies de la Super División Bryophyta, linaje basal de las Embriofitas. Sin embargo, también se presenta en algunas pteridofitas y angiospermas, pero no en gimnospermas. Las PDRs representan en total más de 1300 especies, incluyendo cerca de 300 especies de angiospermas (Porembski, 2011). Sin duda el número de especies de PDRs aumentará en la medida en que se enfoquen más estudios a su descubrimiento.



Más tarde (evolutivamente hablando), la tolerancia a la desecación se vio poco favorecida una vez que las presiones selectivas beneficiaron a plantas que habían estado desarrollando sistemas novedosos y eficientes para la retención de mayores volúmenes de agua en su interior, propiciando una menor dependencia de la disponibilidad de agua circunvecina. De manera paralela, estas nuevas plantas habían aumentado sus tasas de crecimiento así como su complejidad estructuro-funcional (Oliver et al., 2000). Sin embargo, como una ley natural, las oscilaciones ambientales beneficiaron nuevamente a aquellas plantas con mayor capacidad de sobrevivir en ausencia total o parcial de agua, en estos instantes surgen las **licofitas** tolerantes a la desecación: *Selaginella lepidophylla*, *Selaginella tamariscina*, entre otras.

La naturaleza **Parafilética** (un grupo es **parafilético** cuando incluye al ancestro común de sus miembros, pero no a todos los descendientes de este) del grupo de PTD invita a pensar en las continuas oscilaciones ambientales que generaron nuevas especies tolerantes a la desecación o las ya existentes aumentaron su *fitness* biológico. Dicho de otra manera, si observamos una Filogenia Vegetal podemos llegar a conjeturar la posible re-evolución del Fenómeno de Resurrección o más bien de las características que permiten dicho fenómeno (Oliver et al., 2000). Por lo tanto, es natural imaginarnos a las PDR en regiones con poca disponibilidad de agua atmosférica. Las regiones áridas de los continentes Africano y Americano, sin olvidar el oeste Australiano, son hábitats predilectos para estos organismos. Es común encontrarlas en zonas rocosas, donde crecen sobre pequeñas porciones de suelo poco profundas y arenosas; sin embargo, se han encontrado también tanto en ambientes polares como selvas tropicales (Scott, 2000; Phillips et al., 2008).

II. NOMBRES... NOMBRES

Dentro de la Super División Bryophyta (que incluye a los musgos y las hepáticas) se puede mencionar al musgo *Andreaea rothii*, el cual crece en forma de pequeñas almohadillas negruzcas sobre suelos ácidos en montañas rocosas. Este musgo puede recuperar totalmente su capacidad fotosintética tras permanecer hasta 12 meses en estado deshidratado a 32% de humedad relativa y 20°C (Fig. 1A) (Richardson, 1981; Proctor y Tuba, 2002).

Continuando con los musgos, podemos mencionar un par de especies modelo, que han saltado al escenario científico mundial por sus increíbles cualidades. Se trata de *Tortula (Syntrichia) ruralis* (Fig. 1B) y de *Physcomythrella patens* (Bewley, 1973; Cove et al., 2006).

Tabla I. Géneros que integran especies de Plantas Tolerantes a la Desecación en Traqueófitas

Grupo	Taxón	Géneros	Núm. especies de PTD	
Pteridofitas	Lycopodiopsida	<i>Isoetes</i>	1	
		<i>Selaginella</i>	13	
	Pteropsida	<i>Actiniopteris</i>	2	
		<i>Adiantum</i>	1	
		<i>Anemia</i>	1	
		<i>Arthropteris</i>	1	
		<i>Asplenium</i>	8	
		<i>Ceterach</i>	2	
		<i>Cheilanthes</i>	27	
		<i>Ctenopteris</i>	1	
		<i>Doryopteris</i>	3	
		<i>Hymenophyllum</i>	3	
		<i>Mohria</i>	1	
		<i>Notholaena</i>	3	
	<i>Paraceterach</i>	1		
	<i>Pellaea</i>	13		
	<i>Platynerium</i>	1		
	<i>Pleurosorus</i>	1		
	<i>Polypodium</i>	4		
<i>Schizaea</i>	1			
<i>Woodsia</i>	1			
Angiospermas Monocotiledonéas	Cyperaceae	<i>Atrorilepis</i>	1	
		<i>Carex</i>	1	
		<i>Coleochloa</i>	2	
		<i>Cyperus</i>	1	
		<i>Fimbristylis</i>	2	
		<i>Kyllingia</i>	1	
		<i>Mariscus</i>	1	
		<i>Microdracoides</i>	1	
		<i>Trilepis</i>	1	
		<i>Borya</i>	3	
		Liliaceae (Anthericaceae)	<i>Brachyachne</i>	1
			<i>Eragrostiella</i>	3
	<i>Eragrostis</i>		4	
	<i>Micraira</i>		5	
	<i>Microchloa</i>		3	
	<i>Oropetium</i>		3	
	<i>Poa</i>		1	
	<i>Sporobulus</i>		7	
	<i>Tripogon</i>		10	
<i>Vellozia</i>	124			
Velloziaceae	<i>Aylthonia</i>	1		
	<i>Barbacenia</i>	4		
	<i>Barbaceniopsis</i>	2		
	<i>Nanuzia</i>	1		
	<i>Pleurostima</i>	1		
	<i>Xerophyta</i>	28		
	Angiospermas Dicotiledonéas	Myrothamnaceae	<i>Myrothamnus</i>	2
			<i>Blossfeldia</i>	1
		Cactaceae	<i>Talbotia</i>	1
		Acanthaceae	<i>Boea</i>	1
<i>Haberlea</i>			1	
Gesneriaceae		<i>Ramonda</i>	3	
		<i>Chamaegigas</i>	1	
		<i>Craterostigma</i>	3	
Scrophulariaceae		<i>Ilysanthes</i>	1	
		<i>Limosella</i>	1	
	<i>Lindernia</i>	> 15		
	<i>Satureja</i>	1		
Lamiaceae	<i>Micromeria</i>	1		
	<i>Satureja</i>	1		

* Tomado y modificado de Proctor y Tuba, 2002.

En el grupo de investigación de la Dra. Analilia Arroyo y el Dr. Miguel Angel Villalobos (CIBA-IPN) se han identificado especies mexicanas de musgos con tolerancia extrema a la pérdida de agua. Como ejemplos podemos mencionar a *Pseudocrossidium replicatum* y *Bryum billardieri*, los cuales son musgos aislados en la zona volcánica del centro de México. Sorprendentemente, estos musgos pueden recuperar niveles normales de fotosíntesis en minutos a pesar de haber permanecido en estado desecado por más de 7 años (Ríos-Meléndez et al., Cervantes-Díaz et al., Chamorro-Flores et al., manuscritos en preparación).

Para el caso de las Traqueófitas, hay varios géneros con especies tolerantes a la desecación. A continuación, se muestra una lista con los géneros que integran PDR (Tabla I) (Proctor y Tuba, 2002), seguida de algunos ejemplos con una breve descripción por demás interesante:

ALGUNOS EJEMPLOS EN LICOFITAS:

Selaginella lepidophylla. Pertenece a la familia Selaginellaceae.

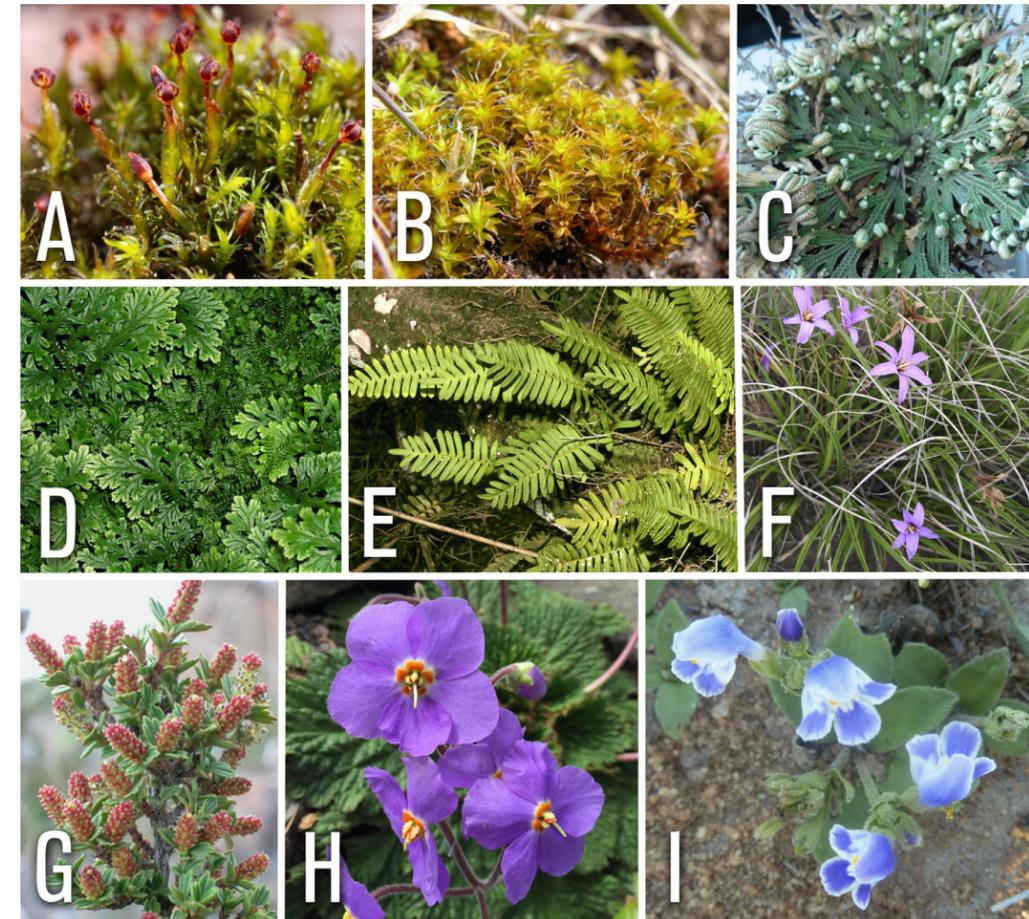


Figura 1. Imágenes representativas de diversas plantas de resurrección
A. *Andreaea rothii* (http://www.biopix.com/dusky-rock-moss-andreaea-rothii_photo-54468.aspx)
B. *Tortula (Syntrichia) ruralis* (http://www.biopix.com/syntrichia-ruralis_photo-53892.aspx)
C. *Selaginella lepidophylla* (CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=290142>)
D. *Selaginella bryopteris* (CC BY-SA 2.1 es, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=139610>)
E. *Polypodium polypodioides* (By Korall - Own work, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8778273>)
F. *Xerophyta viscosa* (By Marco Schmidt [1] - Own work, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1864194>)
G. *Myrothamnus flabellifolius* (By Nko - Own work, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10633502>)
H. *Ramonda serbica* (By Sir Wolf - From en-wiki File:Ramonda_serbica.1.jpg, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11261100>)
I. *Craterostigma plantagineum* (By JMK - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=54119283>)
(las imágenes C a I fueron tomadas de Wikipedia.org y commons.wikipedia.org)

Su reproducción es a través de esporas, sin producción de flores. Necesita de suelos bien drenados y la poca disponibilidad de agua no es un problema para su supervivencia. Su altura promedio es de 5 cm. Es nativa de América del Norte (zonas áridas del estado de Chihuahua). Sus nombres comunes son: planta de la resurrección, rosa de Jericó, siempre viva, flor de piedra, doradilla, flor de roca, magóra (en lengua rarámuri tarahumara). Se tiene registro como planta medicinal con actividad contra *Helicobacter pylori* y de su alta capacidad para permanecer latente por años bajo condiciones de deshidratación, debido en gran medida a su gran capacidad de sintetizar trehalosa (Fig. 1C) (Zentella et al., 1999; Walters et al., 2005).

Selaginella bryopteris. Utilizada en la medicina tradicional de la India. Se le conoce por el nombre que significa "la que infunde vida", al ser un remedio efectivo contra algunas complicaciones graves de salud. Entre sus propiedades medicinales están: mitigación y/o alivio del ardor al orinar, restauración de los ciclos menstruales tras irregularidades, facilita el alumbramiento, cura la ictericia. Esta especie crece en colinas de áreas tropicales, particularmente en regiones aledañas a la montaña *Arawali*. Durante la época de lluvias, crecen exuberantemente, y una vez que llega el verano sufren una severa desecación, que se manifiesta en la disposición contraída de sus frondas (Fig. 1D) (Sah et al., 2005).

Selaginella tamariscina. Especie que puede hallarse en el continente asiático, ya sea en rocas expuestas o en laderas, y se le adjudican propiedades medicinales contra cáncer (Liu, 2008).

UN DIGNO REPRESENTANTE EN PTERIDOFITAS:

Polypodium polypodioides. Helecho de resurrección que usa como substrato ramas de árboles, rocas o regiones de tierra seca. Presenta largos y delgados rizomas, que pueden extenderse a través de grietas o de surcos en la corteza de los árboles. Las hojas (15 cm

de largo y 4 cm de ancho) se disponen a lo largo del rizoma. Una vez que *P. polypodoides* se encuentra en estado deshidratado, se torna de color gris y sus hojas se rizan, estrategia muy común entre las plantas de resurrección (Fig. 1E) (Helseth y Fischer, 2005).

ALGUNOS EJEMPLOS EN ANGIOSPERMAS:

Sporobolus stapfianus. Es un pasto de la Familia Poaceae, **angiosperma monocotiledónea** que se le encuentra en el continente africano, y es capaz de recuperarse rápidamente del estado desecado, potencial de agua equilibrado a 2% de humedad relativa (Gaff et al., 2009).

Xerophyta viscosa. Planta endémica del Sur de África con propiedades medicinales (Fig. 1F) (Farrant et al., 2015).

Myrothamnus flabellifolia. Su tamaño es superior al de muchas plantas de resurrección. Es un arbusto leñoso que puede llegar a una altura de 1.5 m. y suele crecer sobre rocas (Fig. 1G) (Moore et al., 2007).

Ramonda serbica. Especie de la familia Gesneriaceae, cuyos integrantes crecen principalmente en el hemisferio norte e inclusive pueden soportar inviernos congelantes (Fig. 1H) (Quartacci et al., 2002).

Craterostigma plantagineum. Es el miembro más estudiado de la tribu Linderniae, perteneciente a la familia Scrophulariaceae, muchas de ellas son endémicas del continente africano, parece presentar estrategias moleculares únicas y algunos genes son capaces de conferir tolerancia a especies sensibles (Fig. 1I) (Fischer, 2004; Villalobos et al., 2004).

IV. CLASIFICACIÓN DE LAS PLANTAS TOLERANTES A LA DESECACIÓN

Oliver et al. (2000) clasificó a las Plantas Tolerantes a la Desecación en dos grupos artificiales:

- Plantas tolerantes a la desecación
 - Sus procesos de deshidratación e hidratación son rápidos (de minutos a horas)
 - La relación de ácidos grasos saturados presentes en sus membranas es baja en ambos estados (hidratado-deshidratado)
 - El contenido de azúcares solubles y sistemas antioxidantes se mantiene en niveles altos en ambos estados (Moore et al., 2007)
 - Este grupo se compone de plantas no vasculares

(musgos, hepáticas y antocerofitas)

- Plantas con tolerancia modificada a la desecación
 - Pierden agua lentamente, en periodos que van de algunas horas a varios días
 - Se valen de una estrategia vinculada con el Ácido Abscísico para contender con el estrés hídrico y evitar futuros daños a la estructura y organización celular
 - Grupo compuesto por angiospermas y pteridofitas
 - Esta clasificación podría cambiar con los nuevos abordajes “ómicos” en PDR conocidas y las que aún sin duda faltan por conocer.

Esta clasificación podría cambiar con los nuevos abordajes “ómicos” en PDR conocidas y las que aún sin duda faltan por conocer.

Otras clasificaciones incluyen aspectos de tolerancia constitutiva o inducida; el nivel de retención de clorofila en el estado seco, dividiendo a las plantas en homoioclorófilas cuando conservan el aparato fotosintético y membranas cloroplásticas, y poiquiloclorófilas cuando lo desmantelan y pierden la clorofila, misma que deben resintetizar durante la rehidratación (Proctor y Tuba, 2002; Rascio y La Rocca, 2005).

V. POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO ANTE CONTINGENCIAS MUNDIALES: DE LO TEÓRICO A LO PRÁCTICO

La contemplación y estudio de la naturaleza invitan a elucubrar sobre su “propia naturaleza”, sobre las leyes que la rigen, e invitan a manipulaciones que elevan nuestro ego, que restablecen el carácter dominante de la especie humana o en la no mayoría de los casos, proponen modificaciones substanciales que posibilitan un beneficio colectivo. Un poco de astucia arroja resultados asombrosos, por lo que hasta un observador principiante admite el papel imprescindible que el agua cumple en los procesos biológicos. Su condición como disolvente universal es la connotación moderna del *arjé*, el principio de todas las cosas para el filósofo jónico **Tales de Mileto** (Ledesma-Mateos, 2000).

Por lo tanto, no es necesario hacer vulgares conjeturas acerca del valor (en toda la extensión y aplicación del término) del agua, ya que su escasez, contaminación, mal uso o pésima distribución se muestran como unas de las problemáticas más delicadas a las que se enfrenta y enfrentará la humanidad (Minorsky, 2003).

De esta manera, las circunstancias actuales favorecen un nuevo discurso sobre el recurso agua, pues al aumentar el número de habitantes, mayor será el consumo de alimentos; dicho aumento plantea un mayor consumo de agua. Es necesario tener en mente que, a escala global, el sector agrícola utiliza la gran mayoría de los recursos de agua dulce. De esta manera, un objetivo lógico y recurrente es desarrollar nuevas metodologías que lleven a producir significativamente más alimentos utilizando menos agua (Perspectivas del Medio Ambiente Mundial GEO4, GEO5- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)).

En este contexto, se hace presente la Biotecnología que, como alternativa científica socialmente responsable, propone soluciones tangibles a los continuos elementos problemáticos, risibles o invisibles. Diversas metodologías científico-tecnológicas son viables para solucionar o de buena forma desviar los problemas ambientales vinculados con el agua: Generación de variedades cultivables tolerantes a tal estrés abiótico, buen manejo del recurso hídrico que involucra la reutilización, etc. Sin embargo, estas metodologías se ven rebasadas e insuficientes ante el problema. Por lo tanto, es necesario contar con nuevos enfoques que brinden soluciones eficientes y que, sobre todo, corrompan lo menos posible al ambiente.

Actualmente, la Biotecnología de Plantas se vale de la Fisiología Vegetal, la Bioquímica, la Biología Molecular y Celular, y de su discípulo causal, la Ingeniería Genética para impulsar mejoras en el terreno agrícola. De esta manera, el conocer a detalle las rutas metabólicas, sus implicaciones a nivel celular y tisular, las cascadas de señalización presentes bajo ciertas circunstancias, sus posibles manifestaciones y/o repercusiones en la transcripción y traducción en las diversas especies de plantas, permitirá comprender con mayor amplitud y detalle el concepto de **homeostasis vegetal**. Dicha información puede complementarse con trabajos en Botánica, Evolución y Sistemática Filogenética. Estos proyectos emergentes pretenden disipar las incertidumbres con respecto a la predecible insuficiencia alimentaria.

Las Plantas de Resurrección pueden considerarse una píldora **panaceica** para la Biotecnología de Plantas moderna; su clara tolerancia a la pérdida protoplasmática de agua y su increíble resucitar tras largos periodos de latencia, las convierten en interesantísimos modelos de estudio, con un inherente mundo casi inexplorado de metabolitos con capacidades terapéuticas en medicina, agricultura e industria en general. Sus características se muestran como una fuente irresistible para el descubrimiento de nuevos metabolitos, genes o estrategias de regulación de la expresión de los genes que les permiten contender con la desecación, los frenéticos mecanismos bioquímicos y fisiológicos, y posibilitan la generación de novedosas variedades agrícolas

tolerantes, en ciertos rangos, a la escasez de agua (Toldi et al., 2009).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto Politécnico Nacional, SIP IPN y CONACYT por los apoyos otorgados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Alpert, P. 2006. Constraints of tolerance: why are desiccation-tolerant organisms so small or rare? The Journal of Experimental Biology. 209: 1575-1584.
- Bewley, J.D. 1973. Polyribosomes Conserved during Desiccation of the Moss *Tortula ruralis* Are Active. Plant Physiology. (51): 285-288.
- Cove, D., Bezanilla, M., Harries, P., Quatrano, R. 2006. Mosses as model systems for the study of metabolism and development. Annu. Rev. Plant Biol. 57:497-520.
- Farrant, J.M., Cooper K., Hilgart A., Abdalla K., Bentley J., Thomson J., Dace H., Peton N., Mundree S., Rafudeen M. 2015. A molecular physiological review of vegetative desiccation tolerance in the resurrection plant *Xerophyta viscosa* (Baker). Planta 242(2): 407-426.
- Fischer, E. 2004. Scrophulariaceae. En The families and genera of vascular plants. Kubitzki (ed.), Berlin Springer .pp. 333-432
- Gaff D.F., Blomstedt C., Neale A., Le T., Hamill J., Ghasempour H. 2009. *Sporobolus stapfianus*, a model desiccation-tolerant grass. Functional Plant Biology 36(7) 589-599.
- Graham, L.E., Cook, M.E., Busses, J.S. 2000. The origin of plants: Body plan changes contributing to a major evolutionary radiation. Proc National Academic Science. 97 (9): 4535-4540.
- Helseth L.E. y Fischer T.M. 2005. Physical mechanisms of rehydration in *Polypodium polypodioides*, a resurrection plant. Physical Review E 71, 061903.
- Ledesma-Mateos, I. 2000. Historia de la Biología. AGT Editor. México, DF, pp. 26.
- Levitt, J. 1980. Responses of plants to environmental stresses, 2nd edn. Academic Press, New York.
- Liu, M.S., Cheng, C.T., Lin, T.P. 2008. Constitutive Components and Induced Gene Expression are Involved in the Desiccation Tolerance of *Selaginella tamariscina*. Plant Cell Physiology. 49(4): 653-663.
- Minorsky, P.V. 2003. Achieving the *in silico* plant. Systems biology and the future of plant biological research. Plant Physiology. 132: 404-409.
- Moore, J.P., Lindsey, G.G., Farrant, J.M., Brandt, W.F. 2007. An Overview of the Biology of the Desiccation-tolerant Resurrection Plant *Myrothamnus flabellifolia*. Annals of Botany. 99 (2):211-217.
- Moore, J.P., Tuan-Le, N., Brandt, W.F., Driouch, A., Farrant, J.M. 2008. Towards a systems-based understanding of plant desiccation tolerance. Cell. 14 (2): 110-115.
- Oliver, M.J., Tuba, Z., Mishler, D. 2000. The evolution of vegetative desiccation tolerance in land plants. Plant Ecology. 151: 85-100.
- Perspectivas del Medio Ambiente Mundial GEO4. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) 2007 pp: 150. Archivo disponible en la web: http://www.unep.org/geo/geo4/report/GEO-4_Report_Full_ES.pdf. GEO4: www.oei.es/historico/decada/GEO-4_Report_Full_ES.pdf. GEO5:<http://www.pnuma.org/geo/geo5/GEO%205%20ESPANOL%202013%20WEB.pdf>
- Phillips, J.R., Fischer, E., Baron, M., van den, D.N., Facchinelli, F., Kutzer, M., et al. 2008. *Lindernia brevidens*: a novel desiccation-tolerant vascular plant, endemic to ancient tropical rainforests. Plant J:54:938-948.
- Porembski, S. 2011. Evolution, diversity and habitats of poikilohydrous plants. In: Lutge U, Beck E, Bartels D, editors. Plant desiccation tolerance. Springer; p. 139-156.
- Proctor, M.C.F., Tuba, Z. 2002. Poikilohydry and homoiohydry: antithesis or spectrum possibilities? Transley Reviews of New Phytologist. 156: 327-349.
- Quartacci, M.F., Olivera, G., Stevanovi, B., Navari-izzo, F. 2002. Plasma membrane lipids in the resurrection plant *Ramonda serbica* following dehydration and rehydration. Journal of Experimental Botany. 53 (378): 2159-2166.
- Rascio, N., La Rocca N. 2005. Resurrection Plants: The Puzzle of Surviving Extreme Vegetative Desiccation. Critical Rev. Plant Sc. 24(3):209-225.
- Richardson. 1981. *The Biology of Mosses*, Blackwell Scientific Publications: New York, pg.2.
- Sah, N.K., Singh, S.N., Sahdev, S., Banerji, S., Jha, V., Khan, Z., Hasnain, S. 2005. Indian herb 'Sanjeevani' (*Selaginella bryopteris*) can promote growth and protect against heat shock and apoptotic activities of ultra violet and oxidative stress. Journal of Bioscience. 30(4): 499-505.
- Scott, P. 2000. Resurrection Plants and the Secrets of Eternal Leaf. Annals of Botany. 85: 159-66.
- Toldi, O., Tuba, Z., Scott, P. 2009. Vegetative desiccation tolerance: Is it a goldmine for bioengineering crops? Plant Science. 176: 187-199.
- Villalobos, M.A., Bartels, D., Itrurriaga, G. 2004. Stress tolerance and glucose insensitive phenotypes in *Arabidopsis* overexpressing the *CpMYB10* transcription factor gene. Plant Phys. 135: 309-24.
- Walters, C., Hill, L.M., Wheeler, L.J. 2005. Dying while Dry: Kinetics and Mechanisms of Deterioration in Desiccated Organisms. Integr. Comp. Biol. 45:751-758.
- Zentella, R., Mascorro-Gallardo, J.O., Van Dijk, P., Folch-Mallol, J., Bonini, B., Van Vaec, C., Gaxiola, R., Covarrubias A.A., Nieto-Sotelo J., Thevelein J.M., Itrurriaga, G. (1999). A *Selaginella lepidophylla* trehalose-6-phosphate synthase complements growth and stress-tolerance defects in a yeast *tps1* mutant. Plant Physiology, 119(4): 1473-1482.

BIOTECNOLOGÍA FUNGAL APLICADA A LA DEGRADACIÓN DE XENOBIÓTICOS: ENZIMAS PEROXIDASAS Y SU POTENCIAL EN BIORREMEDIACIÓN

Jorge Luis Cuamatzi Flores¹, Berenice Nava Galicia¹, Ulises Esquivel Naranjo², Martha Dolores Bibbins Martínez^{1*}

¹Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Instituto Politécnico Nacional (CIBA-IPN, Tlaxcala), Carretera Estatal Sta. Inés Tecuexcomac – Tepetitla km 1.5, Tlaxcala, México

²Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro, Avenida de las Ciencias S/N Juriquilla, Querétaro, México

*marthadbm1104@yahoo.com.mx

RESUMEN

Los procesos de remediación y remoción de xenobióticos tanto en suelos como en mantos acuíferos suelen ser costosos, tardados y de manera colateral generan compuestos químicos cuya estructura es más tóxica que la de los compuestos originales que se pretende remover. Durante varios años se han realizado investigaciones que buscan nuevas tecnologías para la degradación de tales compuestos de una manera más segura, eficaz y barata. Dentro de estas, ha emergido el uso de microorganismos, y en específico, el de los hongos, los cuales han sido un centro de atención en estas investigaciones, pues además de poseer enzimas que hidrolizan celulosa y hemi-celulosa (estructuras presentes en la materia vegetal), tienen enzimas que degradan la lignina, dentro de estas enzimas se ubican las peroxidases, las cuales con el uso de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) pueden llevar a cabo reacciones de óxido-reducción que dan como resultados la ruptura de anillos aromáticos, estas últimas estructuras químicas son características en una amplia variedad de xenobióticos, tales como los hidrocarburos aromáticos y colorantes sintéticos, razón por la cual son moléculas susceptibles a la acción enzimática de las peroxidases fúngicas.

Palabras clave: Biodegradación, hongos, peroxidases fúngicas

ABSTRACT

The remediation process and xenobiotic removal in soils as in wastewater, this processes are usually expensive, time-consuming and generate more toxic chemical compounds than the starting compounds. For many years, research has been carried out seeking new technologies to degradation of this compounds in a safer and cheaper way. Within these, has emerged the use of microorganisms, in particular, the use of fungi, who have been a focus of these research, because, besides having enzymes that allow them to metabolize cellulose and hemi-cellulose, they have enzymes that carry out the degradation of lignin, within this type of enzymes are the peroxidases which with the use of hydrogen peroxide (H_2O_2) can carry out redox reactions that result in the breakdown of aromatic rings, this structures are also present in a very range of xenobiotics, such as aromatic hydrocarbons and synthetic dyes, for this reason, they are susceptible to the enzymatic action of fungal peroxidases.

Keywords: Biodegradation, basidiomycetes, fungal peroxidases



INTRODUCCIÓN

El uso de organismos y sus metabolitos, representan una alternativa a las técnicas químicas convencionales para los procesos de biorremediación y remoción de compuestos xenobióticos en agua y suelo (Barrasa et al., 2014). En la última década, se han realizado investigaciones enfocadas en peroxidadas fúngicas, que, en comparación con las producidas por bacterias y plantas, estas muestran una mayor capacidad oxidoreductora sobre xenobióticos y compuestos recalcitrantes. La aplicación de estas enzimas en procesos de bioremediación es ya una realidad, por ejemplo, para la decoloración de efluentes textiles, degradación de cloroligninas en la industria del papel, en la remoción de compuestos fenólicos derivados de insecticidas y de hidrocarburos aromáticos generados en la industria del petróleo (Fernández-Fueyo et al., 2014). Por lo anterior, en este artículo se analiza la importancia de los hongos y su potencial aplicación en la transformación o eliminación enzimática de contaminantes ambientales.

LOS HONGOS EN EL MEDIO AMBIENTE

Los hongos son organismos cosmopolitas y tienen la capacidad de desarrollarse en diversas condiciones ambientales (Rodríguez-Rodríguez et al., 2013). Las capacidades metabólicas y fisiológicas que poseen, les permiten colonizar una amplia variedad de hábitats, así como establecer asociaciones biológicas con otros organismos, que resultan cruciales para los ecosistemas (Peraza-Reyes & Malagnac, 2016).

La capacidad de los hongos para sobrevivir en diversos ambientes indica que secretan una gran variedad de enzimas, lo que los hace atractivos para los procesos de biorremediación (Deshmukh, Khardenavis, & Purohit, 2016).

Dentro del reino de los hongos existen varias clasificaciones, una de ellas es la de los hongos de pudrición blanca que son los únicos organismos conocidos, que tienen la capacidad de llevar a cabo la degradación completa de la lignina y esto gracias a su amplia gama de genes codificantes de enzimas oxidoreductasas con un gran potencial para la oxidación y/o degradación de tal polímero (Kirk, 1975; Sánchez, 2009), este potencial les permite actuar sobre diferentes sustratos en cuya estructura se encuentren moléculas aromáticas.

Dentro de los géneros de hongos biotecnológicamente más atractivos se encuentran *Pleurotus ostreatus* (Fig. 1), *Phanerochaete chrysosporium*, *Trametes versicolor* y *Bjerkandera adusta*, debido a las diferentes lacasas y peroxidadas que producen (Dos Santos et al., 2016). Actualmente *P. ostreatus* (Fig. 1) es un hongo de pudrición blanca muy estudiado dentro del campo de la biorremediación debido a la especificidad de sus enzimas extracelulares para degradar



Figura 1. *Pleurotus ostreatus* creciendo en materia vegetal (Fred Stevens, www.mykoweb.com)

lignina, convirtiéndose esta en su principal fuente de carbono en la naturaleza (Fernández-Fueyo et al., 2014; Martínez et al., 1994).

PEROXIDASAS FÚNGICAS, ENZIMAS CON INCREÍBLES CAPACIDADES

Las peroxidadas son enzimas localizadas en todos los dominios de la vida (Finze et al., 1984). El estudio de ellas ha sido tal que se conocen más de 350 estructuras tridimensionales y más de 5000 secuencias proteicas (Koua et al., 2009; Passardi et al., 2007). Estas enzimas participan en diversos procesos biológicos, tales como, respuestas de defensa, respuesta inmune, patogenicidad, detoxificación y degradación de biomasa (Ayala & Torres, 2010).

En comparación con peroxidadas de plantas y otros organismos, las peroxidadas de hongos de pudrición blanca se caracterizan por su alto potencial de oxidación (Ruiz-Dueñas & Martínez, 2010).

El hongo *P. ostreatus* posee una gran variedad de estas enzimas, entre ellas las más estudiadas son la manganosa peroxidada, versátil peroxidada y lacasa, todas clasificadas como óxido-reductasas que tienen un gran potencial en aplicaciones biotecnológicas y ambientales, además de que destacan por arriba de enzimas homologas producidas por microorganismos no ligninolíticos (Cohen, Persky, & Hadar, 2002).

APLICACIONES Y USO POTENCIAL DE PEROXIDASAS EN BIORREMEDIACIÓN DE COLORANTES

Los procesos de degradación por peroxidadas de hongos de pudrición blanca han sido aplicados para la remoción de contaminantes con grupos fenólicos, como lo son los colorantes azoicos, en diversas aplicaciones se ha llegado a la mineralización del xenobiótico generándose dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O) lo que significa una degradación completa de la molécula (Spadaro & Gold, 1992).

De igual forma, se ha demostrado que la decoloración de colorantes de tipo antraquinona mediada por peroxidadas, es más eficiente esto en comparación a la observada para los colorantes de tipo azoico (Selvam, 2003).

Mezclas enzimáticas de peroxidadas ligninolíticas producidas por varios hongos de pudrición blanca, han sido aplicados para la degradación total de colorante sulfónicos (Shrivastava, Christian, & Vyas, 2005).

Debido a su baja estabilidad, el empleo de enzimas en medios acuosos se dificulta, por tal razón, técnicas de inmovilización han sido consideradas como factibles para la biorremediación de efluentes industriales (Ijoma & Tekere, 2017). De entre las ventajas que representan usar enzimas inmovilizadas, destacan que se prolonga el tiempo en el que estas son activas además de que son más eficientes al momento de degradar (Asgher, Aslam, & Iqbal, 2013).

Todas estas capacidades han perfilado a las peroxidadas para ser empleadas en diversos procesos de biocatalíticos, entre los que destacan los de biorremediación de suelos y aguas. (Fig. 2).



Figura 2. Diversas fuentes de peroxidadas y su aplicación en la biorremediación de efluentes industriales

PERSPECTIVAS

Los hongos son un modelo de estudio muy importante y atractivo en diversas áreas de la biotecnología, una de las ramas en las que más sobresalen es en el ámbito de la biorremediación gracias a las enzimas que producen, en especial, las peroxidadas. El empleo de tales enzimas para la degradación no solo de colorantes sino de otros compuestos xenobióticos, es prometedor y alentador, dado a que los productos que generan no son tóxicos

en comparación a los generados con técnicas con fundamentos fisicoquímicos.

Conocer más a detalle los potenciales y las capacidades de estas enzimas, permitirán implementar técnicas más eficientes de biorremediación.

BIBLIOGRAFÍA

- Asgher, M., Aslam, B., & Iqbal, H. M. N. (2013). Novel catalytic and effluent decolorization functionalities of sol-gel immobilized *Pleurotus ostreatus* IBL-02 manganese peroxidase produced from bio-processing of wheat straw. *Chinese Journal of Catalysis*, 34(9), 1756–1761.
- Ayala, M., & Torres, E. (2010). Introduction. In E. Torres & M. Ayala (Eds.), *Biocatalysis Based on Heme Peroxidases* (pp. 1–4). Springer Berlin Heidelberg.
- Barrasa, J. M., Blanco, M. N., Esteve-Raventós, F., Altés, A., Checa, J., Martínez, A. T., & Ruiz-Dueñas, F. J. (2014). Wood and humus decay strategies by white-rot basidiomycetes correlate with two different dye decolorization and enzyme secretion patterns on agar plates. *Fungal Genetics and Biology*, 72, 106–114.
- Cohen, R., Persky, L., & Hadar, Y. (2002). Biotechnological applications and potential of wood-degrading mushrooms of the genus *Pleurotus*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 58(5), 582–594.
- Deshmukh, R., Khardenavis, A. A., & Purohit, H. J. (2016). Diverse Metabolic Capacities of Fungi for Bioremediation. *Indian Journal of Microbiology*, 56(3), 247–264.
- Fernández-Fueyo, E., Castanera, R., Ruiz-Dueñas, F. J., López-Lucendo, M. F., Ramírez, L., Pisabarro, A. G., & Martínez, A. T. (2014). Lignolytic peroxidase gene expression by *Pleurotus ostreatus*: Differential regulation in lignocellulose medium and effect of temperature and pH. *Fungal Genetics and Biology*, 72, 150–161.
- Ijoma, G. N., & Tekere, M. (2017). Potential microbial applications of co-cultures involving ligninolytic fungi in the bioremediation of recalcitrant xenobiotic compounds. *International Journal of Environmental Science and Technology*.
- Kirk, T. K. (1975). Preparation and microbial decomposition of synthetic [14C] lignins. *Journal of Biological Chemistry*, 250(14), 2515–2519.
- Koua, D., Cerutti, L., Falquet, L., Sigrist, C. J. A., Theiler, G., Hulo, N., & Dunand, C. (2009). PeroxiBase: a database with new tools for peroxidase family classification. *Nucleic Acids Research*, 37(suppl 1), D261–D266.
- Martínez, A. T., Camarero, S., Guillén, F., Gutiérrez, A., Muñoz, C., Varela, E., ... Pelayo, J. (1994). Progress in biopulping of non-woody materials: Chemical, enzymatic and ultrastructural aspects of wheat straw delignification with ligninolytic fungi from the genus *Pleurotus*. *FEMS Microbiology Reviews*, 13(2–3), 265–273.
- Passardi, F., Theiler, G., Zamocky, M., Cosio, C., Rouhier, N., Teixeira, F., ... Dunand, C. (2007). PeroxiBase: The peroxidase database. *Phytochemistry*, 68(12), 1605–
- Peraza-Reyes, L., Malagnac, F. (2016). Sexual development in fungi. In *Growth, Differentiation and Sexuality* (pp. 407–455). Springer International Publishing.
- Rodríguez-Rodríguez, Carlos E., Castro-Gutiérrez, Victor, Chin-Pampillo, Juan Salvador, Ruiz-Hidalgo, K. (2013). On-farm biopurification systems: role of white rot fungi in depuration of pesticide-containing wastewaters, 345, 1–12.
- Ruiz-Dueñas, F. J., & Martínez, A. T. (2010). Structural and Functional Features of Peroxidases with a Potential as Industrial Biocatalysts. In E. Torres & M. Ayala (Eds.), *Biocatalysis Based on Heme Peroxidases* (pp. 37–59). Springer Berlin Heidelberg.
- Sánchez, C. (2009). Lignocellulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi. *Biotechnology Advances*, 27(2), 185–194.
- Selvam, K. (2003). Decolorization of azo dyes and a dye industry effluent by a white rot fungus *Thelephora sp.*, 88, 115–119.
- Shrivastava, R., Christian, V., & Vyas, B. R. M. (2005). Enzymatic decolorization of sulfonphthalein dyes, 36(February 2004), 333–337.
- Spadaro, J. T., & Gold, M. H. (1992). Degradation of Azo Dyes by the Lignin-Degrading Fungus *Phanerochaete chrysosporium*, 58(8), 2397–2401.

EVALUACIÓN DEL USO DE COMPOSTAS SOBRE EL CULTIVO DE LECHUGA

Joseph Israel Hernández Rivadeneyra, Javier Carvajal Avalos, Rigoberto Castro Rivera, Myrna Solís Oba.
Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Carretera Estatal Santa Inés Tecuexcomac-Tepetitla, km. 1.5, Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, cp 90700.
Correo electrónico: myrobatlx@yahoo.com.mx

RESUMEN

En la actualidad hay varios problemas ambientales como la alta generación de residuos orgánicos y su inadecuada disposición, así como el uso excesivo de fertilizantes químicos que dañan los suelos, repercutiendo en una menor producción agrícola. En este proyecto, se evaluó el proceso de compostaje usando residuos agrícolas, vegetales y animales. Las compostas resultantes tuvieron valores de conductividad y contenido de C, K y P, dentro de los valores recomendados para ser aplicadas en el cultivo agrícola. Las compostas se usaron para el cultivo de lechuga, con dos de ellas las plantas crecieron más y tuvieron mayor número de hojas promedio comparadas con el uso de fertilizantes químicos. Este resultado es interesante ya que indica que es posible sustituir el uso de fertilizantes por compostas, con lo cual se eliminarán los problemas asociados al uso de agroquímicos.

Palabras clave: composta, residuos orgánicos, lechuga.

ABSTRACT

At present there are several environmental problems such as the high generation of organic waste and its inadequate disposal, the excessive use of chemical fertilizers that damage the soil, resulting in less agricultural production. This project evaluated the composting process using agricultural, vegetable and animal waste. The resulting compounds had values of conductivity and content of C, K and P, within the values recommended to be applied in the agricultural crop. The composts were used for lettuce cultivation, with two of them, lettuce grew more and had more leaves compared to the use of chemical fertilizers. This result is interesting since it indicates that it is possible to substitute the use of fertilizers by compounds, which will eliminate the problems associated with the use of agrochemicals.

Key words: compost, organic residues, lettuce



I. INTRODUCCIÓN

I.1 AGRICULTURA ORGÁNICA.

La agricultura orgánica es el sistema de producción que trata de maximizar la utilización de los recursos naturales, propiciando la fertilidad de los suelos, la actividad biológica propia del mismo sustrato y minimizar el uso de recursos no renovables. Los pesticidas sintéticos, fertilizantes minerales, productos farmacéuticos, los lodos residuales y la irradiación están prohibidos en todos los estándares orgánicos (FAO, 2014).

A nivel mundial la producción de alimentos orgánicos ha ido en aumento, llegando a destinar 37.2 millones de hectáreas en el 2011. El valor total en ventas ese mismo año fue por 63 mil millones de dólares. Desde el año 2002, la agricultura orgánica ha mantenido un crecimiento constante y considerable a pesar de la recesión económica global, y se considera que al menos el 1% del total de las tierras cultivadas en América Latina y el Caribe se dedican a cultivos orgánicos (FAO, 2014).

El uso de materia orgánica se ha convertido en la base para el desarrollo de agricultura orgánica, ésta debe considerar dos aspectos esenciales: (a) la diversidad estructural y de procesos, y (b) el manejo ecológico del suelo y nutrición (Brenes, 2003). El hombre ha aplicado toda clase de materias orgánicas a los suelos cultivados, durante mucho tiempo se consideró que las plantas se nutrían directamente del humus del suelo y la presencia de este material marcaba su fertilidad (Julca-Otiniano, et al, 2006).

Se ha demostrado que la utilización de fertilizantes orgánicos, incrementa la productividad del suelo en diversos tipos de cultivo, favorecen la mineralización y la capacidad de intercambio catiónico debido a su procedencia y composición (Félix-Herrán, et al, 2008). De igual manera favorece el restablecimiento de las características fisicoquímicas del suelo, al agregar materia orgánica al suelo, se mejora su contenido de carbono, sirviendo como reserva de nutrientes y micronutrientes. Los niveles de nitrógeno presentes, la capacidad de retención del agua se restablecen y se regula el pH (Julca-Otiniano, et al, 2006).

I.2 LECHUGA

La lechuga posee un alto contenido de agua, vitaminas, minerales y fibra que favorece y facilita el peristaltismo. Según el Sistema Mexicano de Alimentos Equivalentes, es una muy buena fuente de vitamina A, C, ácido fólico y potasio (Infoalimentación), por lo que resulta una fuente importante de dichos nutrientes en la dieta mexicana por su composición nutrimental y fácil acceso (alimentos.org), ver figura 1.



Figura 1. Cultivo de lechuga

En promedio se estima que la cantidad de nutrientes requeridos por hectárea de cultivo de lechuga son: 50 kg/ha de Nitrógeno, 25 kg/ha de Fósforo, 130 kg/ha de Potasio (Casaca, et al, 2005), 35 kg/ha de Calcio y 10 kg/ha de Magnesio (Casaca, et al, 2005).

I.3 COMPOSTAJE

El compostaje es un proceso metabólico realizado por diferentes microorganismos, que, en presencia de oxígeno, aprovechan el nitrógeno (N) y el carbono (C) presentes para producir biomasa, calor y un sustrato sólido, con menos C y N, pero más estable, llamado compost o composta (Navarro, 1999). El compostaje es una práctica ampliamente aceptada para el manejo de residuos y obtención de sustratos útiles para la agricultura; por un lado, ayuda a la protección del medio ambiente y por otro, para lograr una producción agrícola sostenible. El compostaje proporciona la posibilidad de transformar de una manera segura los residuos orgánicos en insumos para la producción agrícola (Altamirano y Carranza, 2006). La FAO define como composta a la mezcla de materia orgánica en descomposición, en condiciones aeróbicas, que se emplea para mejorar la estructura del suelo y proporcionar nutrientes (Román, et al, 2013).

La composta tiene la capacidad de restablecer los nutrientes perdidos por la erosión del suelo, restablece los niveles adecuados de pH, CIC, densidad y textura del sustrato, favorece la retención de humedad e incorpora nutrientes y micronutrientes al suelo, que permanecen por mayor tiempo disponibles en el suelo, ya que evita la lixiviación de los mismos (Navarro, 1999; Altamirano y Carranza, 2006; FAO, 2014).

El objetivo del presente fue elaborar compostas con residuos de diferente naturaleza y aplicarlas al cultivo de lechuga.

2. Métodos y Materiales

2.1 Preparación de compostas

Se montaron cuatro pilas de residuos para preparar las compostas, con la composición que se describe en la tabla 1. El proceso de compostaje se realizó por el método de pilas. La aireación se realizó cada 15 días por volteos mecánicos, después de airear se humedecieron los residuos. Este proceso continuó hasta que se observó completa descomposición de los residuos.

Tabla 1. Materiales usados para la preparación de las compostas

Identificación de la composta	Residuo vegetal	Estiércol	Rastrojo
RV	96 kg	---	4.5 Kg
E	---	144 kg	4.5 Kg
E-RV	24 kg	144 kg	4.5 Kg
RA	---	---	70 Kg

Conforme inició el proceso de descomposición de los materiales, cada semana se tomaron muestras de cada pila para realizarles mediciones de temperatura, pH y CE. Antes de aplicar las compostas se hizo prueba de madurez, según metodología descrita por Zucconi et al. (1981). En la figura 2, se observa una fotografía de dos de las pilas montadas.



Figura 2. Pila para las compostas: tratamiento E-RV y tratamiento VE

2.2 Cultivo de lechuga

Los cultivos se llevaron a cabo bajo condiciones de invernadero en macetas de un kg de capacidad, se colocó suelo agrícola aledaño al Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada y se mezcló con 10% en peso seco de cada una de las compostas. Como controles se usó suelo sin ninguna adición de abono y suelo fertilizado químicamente. Los parámetros que se midieron en las plantas fueron: altura de las plantas y número de hojas.

3. RESULTADOS

3.1 PROCESO DE COMPOSTAJE

En la figura 3 se muestra los cambios que hubo en la temperatura, en las cuatro pilas que se montaron. Se observó que la temperatura fue disminuyendo conforme avanzó el proceso de compostaje, lo cual indica una disminución en la actividad microbiana ocasionada por la menor disponibilidad de nutrientes.

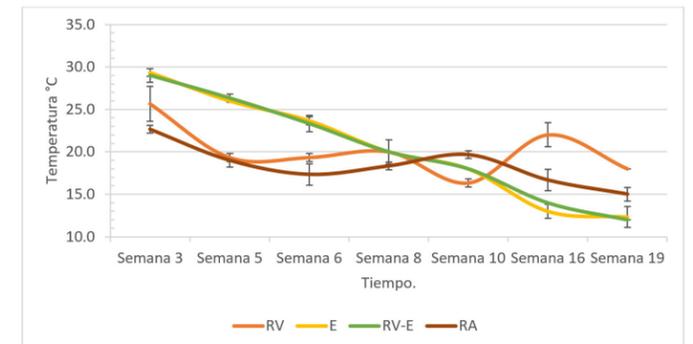


Figura 3. Evolución de la temperatura durante el proceso de compostaje

Según Sánchez-Monedero et al. (2001), la evolución del pH en el compostaje presenta tres fases: durante la fase mesófila inicial se observa una disminución del pH debido a la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica más lábil, produciéndose una liberación de ácidos orgánicos. Eventualmente, esta bajada inicial del pH puede ser muy pronunciada si existen condiciones anaeróbicas, pues se formarán aún más cantidad de ácidos orgánicos. En una segunda fase se produce una progresiva alcalinización del medio, debido a la pérdida de los ácidos orgánicos y la generación de amoníaco procedente de la descomposición de las proteínas y en la tercera fase, el pH tiende a la neutralidad debido a la formación de compuestos húmicos que tienen propiedades tampón. Todas las compostas quedaron en un pH básico, lo ideal es que este parámetro tenga un valor entre 6 y 8.

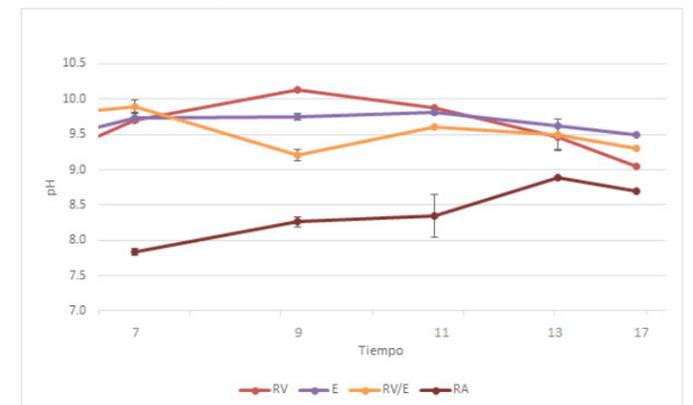


Figura 4. Cambios en el pH durante el proceso de compostaje

La conductividad eléctrica (CE) de una composta está determinada por la naturaleza y composición del material de partida, fundamentalmente por su concentración de sales y en menor grado por la presencia de iones amonio o nitrato formados durante el proceso. La CE tiende generalmente a aumentar durante el proceso de compostaje debido a la mineralización de la materia orgánica, hecho que produce un aumento de la concentración de nutrientes (Sánchez-Monedero, et al, 2001). Lo recomendable es que la CE sea menor a 4 dS/cm, todas las compostas cumplieron con este valor, lo cual indica que hubo formación de sales.

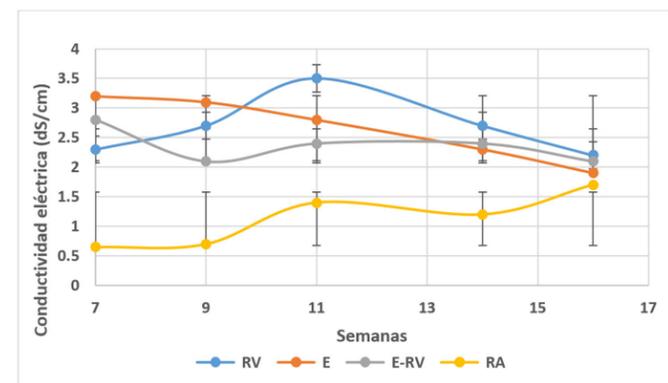


Figura 5. Cambios en la conductividad durante el proceso de compostaje

La tabla 2 muestra los parámetros finales medidos a las cuatro compostas y su comparación con la NADF-020-AMBT-2011. El pH fue alcalino, la conductividad eléctrica y el contenido de nutrientes estuvieron en los intervalos marcados por la norma. La composta elaborada con residuos vegetales y estiércol tuvo los valores más altos en N y P y la elaborada únicamente con rastrojo tuvo la mayor cantidad de carbono orgánico. El índice de germinación fue bajo, ya que el valor recomendado es mayor al 75% (NADF-020-AMBT-2011).

Tabla 2. Parámetros finales de las compostas

Composta	pH	Parámetros finales					
		CE (mS/cm)	IG (%)	%C orgánico	K (%K ₂ O)	P (mg/kg)	% Humedad
RV	9.0±0.02	3.4±0.00	61.5±10.11	28.53%	0.84	320	2.9±0.45
E	9.5±0.02	4.1±0.00	63.4±28.99	47.06%	1.4	254	6.9±0.73
E-RV	9.3±0.02	3.8±0.00	64.9±2.12	45.11%	1.41	590	4.2±0.19
RA	8.5±0.01	2.3±0.00	89.8±1.9	54.21%	1.14	106	10.1±0.48
Norma*	6.5 a 8	<8dS/cm	>75%	>20%	1 a 3 %	1 a 3 %	25-35%

* NADF-020-AMBT-2011.

3.2 CULTIVO DE LECHUGA

Se evaluaron dos parámetros a las plantas de manera semanal: altura de la parte aérea y el número de hojas, los cuales se compararon con un control suelo, donde no hubo adición de ningún fertilizante (línea verde discontinua) y con

control aplicando fertilizante (línea azul discontinua). En el caso de la altura, se observa que con todas las compostas se obtuvo mayor altura que en el control suelo, lo que indica que efectivamente las compostas aportaron nutrientes (ver figura 6). Con la composta preparada con rastrojo vegetal se obtuvo la mayor altura, ésta composta tuvo el mayor contenido de C y mayor índice de germinación, le siguió en altura las pantas donde se aplicó la composta preparada con residuos vegetal. No hubo diferencias estadísticas en la altura alcanzada con las demás compostas y el control fertilizante químico.

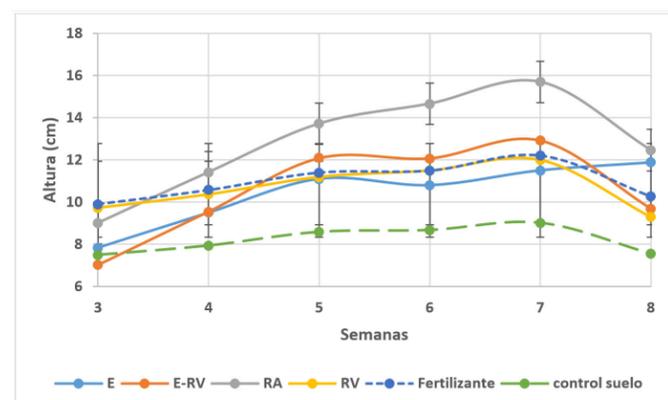


Figura 6. Altura promedio de las plantas durante el ciclo de cultivo

La figura 7 muestra el número promedio de hojas, nuevamente con el control suelo se obtuvo las plantas con menor número de hojas. El mayor número de hojas se obtuvo con las plantas del tratamiento RA, seguido del RV, los cuales mostraron mayor número de hojas promedio incluso del control donde se aplicó fertilizante.

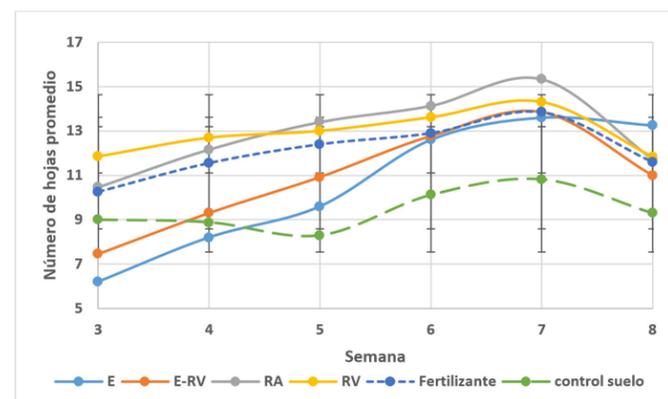


Figura 7. Número de hojas promedio registradas durante el ciclo de cultivo

CONCLUSIONES

Utilizando residuos vegetales, animales o la mezcla de ellos se obtienen compostas con contenido de carbono orgánico, K, P y con una conductividad eléctrica que cumplen con la norma NADF-020-AMBT-2011, por lo que dichas compostas pueden ser aplicadas en agricultura.

Las compostas obtenidas con residuos vegetales, animales o la mezcla de ellos, promovieron el desarrollo del cultivo de lechuga, incluso dando mejores resultados que utilizando fertilizantes químicos. Éste resultado es interesante ya que sugiere que es posible sustituir el uso de fertilizantes por compostas, con lo cual se eliminarán los problemas asociados al uso de agroquímicos.

BIBLIOGRAFÍA

Alimentos.org Lechuga, información general de la lechuga. <http://alimentos.org.es/lechuga> [Fecha de revisión 30 de marzo 2017].

Altamirano, F.M y Carranza, C.C. (2006). Estudio comparativo para la elaboración de compost por técnica manual. Rev. Inst. investig. Fac. geol. minas metal. cienc. geogr. 9(17): 75-84.

Brenes, L. 2003. Producción orgánica: algunas limitaciones que enfrentan los pequeños productores. Manejo Integrado Plagas Agroecol 70: 7-18.

Casaca, D. 2005. El cultivo de lechuga. Guías tecnológicas de frutas y vegetales.

Banco interamericano de desarrollo. Documento técnico. pp 11.

FAO. Capítulo I. Conceptos y temas generales de la agricultura orgánica. <http://www.fao.org/docrep/005/y4137s/y4137s03.htm> [Fecha de revisión 26 de febrero del 2017]

Félix, H.J.A., Raudel, R.S.T., Rojo, M.G.E., Martínez, R.R. and Olalde, P.V. 2008. Importancia de los abonos orgánicos. Ra Ximhai. 4(1): 57-67.

Infoalimentación, Propiedades nutricionales de frutas y hortalizas. <http://www.infoalimentacion.com/>

frutas_hortalizas/propiedades_nutricionales_frutas_hortalizas.htm [Fecha de revisión 24 de febrero del 2017].

Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., Bello-Amez, S. 2006. La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. Idesia. 24(1): 49-61.

NADF-020-AMBT-2011. Norma ambiental para el Distrito Federal NADF-020-AMBT-2011, que establece los requerimientos mínimos para la producción de composta a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de calidad de la composta producida y/o distribuida en el Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México.

Navarro, R. 1999. Manual para hacer composta aeróbica. Ed. CESTA. Amigos de la Tierra. San Salvador, El Salvador. pp. 1-21

Román, P., Martínez, M. and Pantoja, A. 2013. Manual de compostaje para el agricultor. Experiencias en América Latina. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Chile. pp 21-43.

Sánchez-Monedero, M.A., Roig, A., Paredes, C. and Bernal, M.P. 2001. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. Biores. Technol. 78(3): 301-308.

Zucconi, F., Pera, A., Forte, M. and De Bertoldi, M. (1981). Evaluating toxicity of immature compost. BioCycle, 22: 54-57.





HONGOS DE PUDRICIÓN BLANCA COMO BIOTECNOLOGÍA EMERGENTE PARA COMBATIR AFLATOXINAS

Iván González Caloch, Sarai Karina Cruz Pacheco, Soley Berenice Nava Galicia, Marlon Rojas López, Martha Dolores Bibbins Martínez*

Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada-Instituto Politécnico Nacional Ex-Hacienda San Juan
Molino Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla de Lardizábal Km 1.5, Tlaxcala, México C.P. 90700

*mbibbinsm@ipn.mx

RESUMEN

Los granos y cereales son uno de los alimentos más consumidos a nivel mundial, sin embargo, su producción se ve afectada por hongos patógenos, entre ellos *Aspergillus flavus*, organismo productor de toxinas denominadas aflatoxinas. Las aflatoxinas son un grupo de metabolitos secundarios altamente carcinogénicos, inmunosupresores y hepatotóxicos. La invasión de diversos granos por este hongo y su subsecuente contaminación con aflatoxinas ocurre durante el cultivo, el manejo postcosecha y durante el procesamiento del grano. Por lo anterior su presencia en los alimentos representa un riesgo potencial para la salud de los seres humanos y animales.

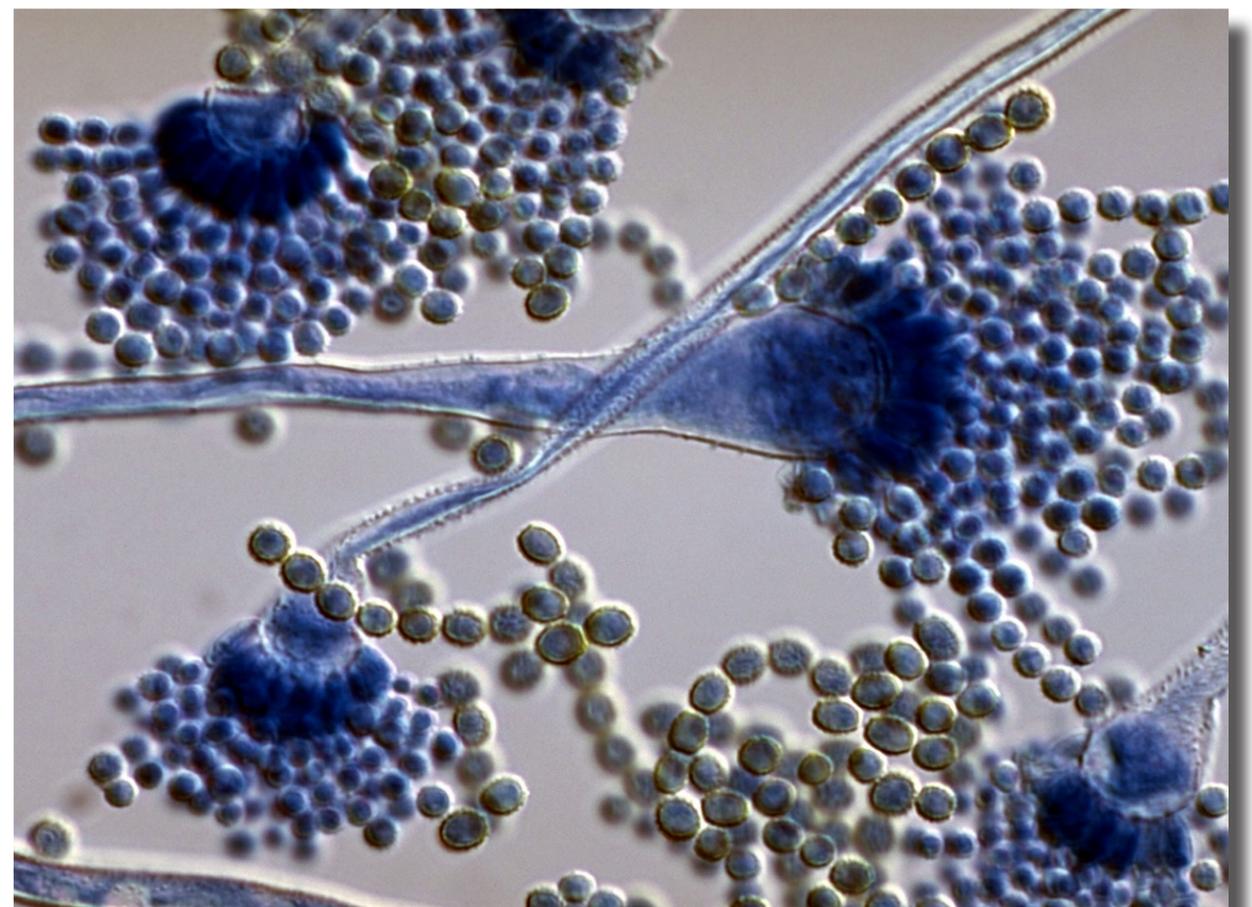
Una alternativa biotecnológica para combatir este problema son las enzimas ligninolíticas producidas por hongos de pudrición blanca. Las enzimas ligninolíticas como la lacasa y la manganeso peroxidasa tienen un alto potencial para oxidar y/o degradar compuestos recalcitrantes de estructuras complejas como las aflatoxinas, haciendo posible el desarrollo de métodos para la descontaminación de alimentos.

Palabras clave: aflatoxinas, *Aspergillus flavus*, enzimas ligninolíticas, hongos de pudrición blanca

ABSTRACT

Grains and cereals are one of the most consumed foods around the world, however, their production is affected by pathogenic fungi, such as the aflatoxin producing organism *Aspergillus flavus*. Aflatoxins are a group of secondary metabolites highly carcinogenic, immunosuppressive and hepatotoxic. The invasion of various grains by this fungus and its subsequent contamination by aflatoxin takes place during cultivation, post-harvest handling and during the processing of the grain. Therefore, its presence in food represents a potential risk for the health of humans and animals. A biotechnological alternative to combat this problem are the ligninolytic enzymes produced by white rot fungi. The lacase and manganese peroxidase are ligninolytic enzymes that have a high potential to oxidize or degrade recalcitrant compounds of complex structures such as aflatoxins, making possible the development of decontamination methods for foods.

Key words: aflatoxins, *Aspergillus flavus*, ligninolytic enzymes, white-rot fungi



INTRODUCCIÓN

Los hongos causan la mayoría de las enfermedades infecciosas de las plantas. De las casi 10,000 especies de hongos que han sido descritas, se sabe que más de 8,000 son patógenos de las plantas. Estos organismos pueden tener la capacidad de atacar a todas las partes de una planta y causar una gran variedad de síntomas, desde pudriciones de las raíces, pudrición de partes aéreas, manchas foliares, marchitamiento y raquitismo. Esto representa un grave problema particularmente para los cultivos de importancia económica como el maíz y otros granos y cereales que son ampliamente consumidos a nivel mundial ya que la producción de los mismos se ve severamente afectada y la contaminación subsecuente por diversos tipos de micotoxinas es un problema de salud pública particularmente en países de poco desarrollo. Siendo así los hongos el principal grupo de microorganismos responsables de enfermedades de plantas que amenazan la seguridad alimentaria mundial (Idnurm y Meyer, 2014).

Los principales hongos productores de micotoxinas, conocidos como micotocigénicos, corresponden a los géneros *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium*. De particular importancia para nuestro país es el hongo *Aspergillus flavus*, patógeno que puede infectar al maíz, específicamente a las mazorcas, causando la enfermedad denominada pudrición de mazorca (figura 1), dicha infección tiene una gran importancia pues no sólo afecta a la planta, sino que también puede llegar a afectar al ser humano, ya que este hongo tiene la capacidad de producir aflatoxinas; sustancias extremadamente tóxicas.

Por lo anterior es medular el desarrollo de estrategias que prevengan la contaminación de cultivos con hongos patógenos y también estrategias que eliminen las aflatoxinas de los alimentos que ya están contaminados. En esta dirección, las enzimas de hongos de pudrición blanca, representan una alternativa para atender esta problemática.



Figura 1. Maíz contaminado con *Aspergillus flavus*. Mississippi State University plant pathologist (Weaver, 2012).

I. IMPACTO DE LAS AFLATOXINAS PRODUCIDAS POR *Aspergillus flavus*

I.1 *Aspergillus flavus*

Aspergillus flavus es una de las especies más conocida del género *Aspergillus*. Es un hongo patógeno oportunista de plantas y animales (figura 2a), aunque la mayor parte de su vida la pasa como saprofito en el suelo en su forma micelial o como esclerocios que contribuyen a su supervivencia por un periodo de tiempo mayor. Los conidios producidos por el micelio o esclerocios pueden servir como inóculo primario para enfermedades (figura 2b) (Sheidegger y Payne, 2003).

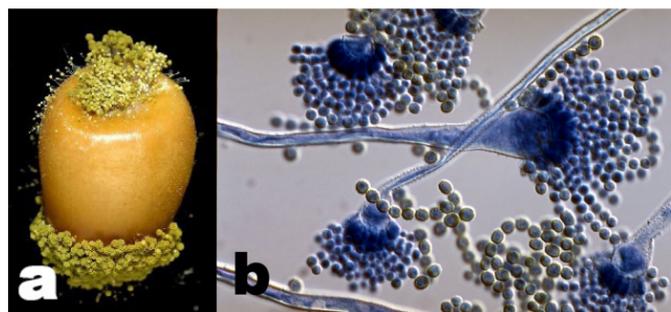


Figura 2. a) Grano de maíz infectado con *A. flavus*. b) Estructuras reproductivas de *A. flavus* (Loeffler, 2017).

I.2 Aflatoxinas (AF)

Las AF son metabolitos secundarios tóxicos, altamente carcinogénicos inmunosupresivos y hepatotóxicos, producidos, sobre todo, por las especies de *Aspergillus flavus* y *Aspergillus parasiticus* (Yu et al 2002).

Debido a su alta estabilidad son un problema durante el cultivo, almacenamiento, transporte, procesamiento y etapas de manipulación de los granos agrícolas (Udomkun, et al, 2017). Los cultivos más afectados son los cereales (maíz, sorgo, mijo, arroz, trigo, cebada), oleaginosas (olivo, soja, girasol, algodón), especias (pimienta de chile, pimienta negra, coriandro, curcuma longa, jengibre), árboles (nogal, avellano, almendro, pistaches, coco) y frutos secos (cacahuete, castaña, higos).

La estructura básica de las AF (figura 3) es un anillo dihidrodifurano o tetrahidrodifurano unido a una cumarina con un anillo de cinco o seis átomos de carbono (Liu, et al, 2013). Son muy fluorescentes, propiedad que es utilizada para su detección y análisis (Chauhan, et al, 2016).

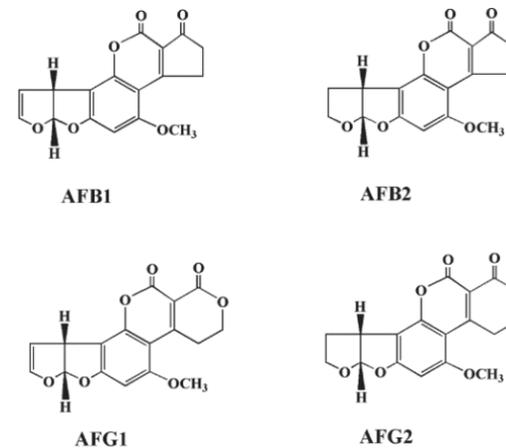


Figura 3. Estructuras químicas de las principales aflatoxinas

I.3 PROBLEMÁTICA DE LA CONTAMINACIÓN DE MAÍZ EN MÉXICO POR *A. flavus*

Las AF en México son un importante peligro en la salud por las siguientes razones: a) México es uno de los países con alto consumo per-cápita de maíz en el mundo (aproximadamente 325 gramos por día), b) México produce alrededor de 20 millones de toneladas de maíz por año, c) las condiciones de almacenamiento del maíz en México no están muy bien desarrolladas y no se tiene un monitoreo regular de la contaminación por AF (Anguiano, et al, 2005).

II. LOS HONGOS DE PUDRICIÓN BLANCA Y LA DEGRADACIÓN BIOLÓGICA DE LAS AFLATOXINAS

Los hongos de pudrición blanca se denominan así por ser capaces de crecer sobre la madera de árboles y descomponer la misma, favoreciendo la degradación de lignina y celulosa. Esta capacidad única para mineralizar la lignina hasta CO_2 es debida a la producción extracelular de enzimas modificadoras de lignina (LME). La lignina peroxidasa (LiP), manganeso peroxidasa (MnP) y las lacasa son las principales enzimas ligninolíticas extracelulares de estos hongos. Pero no solamente degradan lignina, debido al potencial que presentan tiene la capacidad de degradar contaminantes recalcitrantes, tales como dibenzodioxinas policloradas (PCDD) (Kamei et al., 2005), clorofenoles (Joshi & Gold, 1993), e hidrocarburos policíclicos aromáticos

(Bezalel et al., 1996; Collins et al., 1996). En estudios realizados particularmente con las enzimas MnP y lacasa se observó su eficiencia en la degradación de metoxicloro (Hirai et al., 2004) y Irgarol 1051 (Ogawa et al., 2004) dos importantes plaguicidas empleados a nivel mundial; así como también en la eliminación de las actividades estrógenicas de bisfenol A (BPA), nonilfenol, 4-terc-octilfenol, genisteina entre otros (Tamagawa et al., 2005). Recientemente, una nueva aplicación de estas enzimas es en la degradación de la aflatoxina AFB1, representando una alternativa viable y segura para eliminar micotoxinas de los alimentos (Alberts et al, 2009)

II.1 DEGRADACIÓN DE AFB1 POR LA ENZIMA LACASA (LC)

Las lacasas (p-difenol: oxígeno óxido reductasas EC 1.10.3.2) son oxidasas multicobre que se encuentran ampliamente distribuidas tanto en plantas superiores como en hongos y bacterias. Los hongos de pudrición blanca como *Pleurotus spp* son productores eficientes de las lacasas, estas enzimas catalizan la oxidación de fenoles, aminas aromáticas y otros compuestos no fenólicos, reduciéndolos de oxígeno molecular a agua. La actividad de LC puede aplicarse a los sustratos no fenólicos por el uso de mediadores redox sintéticos o naturales, estos mediadores, después de ser oxidados por LC, se difunden fuera del sitio activo y oxidan compuestos recalcitrantes que poseen alto potencial redox o de alto peso molecular (figura 4). Diferentes mediadores pueden actuar sobre compuestos químicamente relacionados ampliando la gama de su sustrato, por lo tanto, la aplicación de lacasa para la biotransformación de AFB1 es una alternativa en la cadena de alimentos contaminados por esta micotoxina (Loi, et al, 2016).

Se han estudiado más de 50 cepas de hongos de pudrición blanca con actividad de lacasas dentro de los cuales destacan *Peniophora sp* la cual al ser cultivada en medio mínimo mineral (MM) produce niveles de lacasa de 496 U/L; y al ser probado para la degradación de AFB1 registra porcentajes entre 40- 45%. En tanto que el hongo *Pleurotus ostreatus* cultivado en MM y suplementado con alcohol veratrílico, registra niveles de lacasa de 416,39 U/L; pero mejora el porcentaje de degradación de AFB1 de 35 hasta un 90%.

Trametes versicolor es otro de los hongos productores de la enzima lacasa, estudios realizados con la enzima purificada han favorecido la degradación de AFB1. Otra de las opciones en la optimización de la degradación de AFB1 ha sido el uso de enzimas lacasa recombinantes producidas por *Aspergillus niger*.

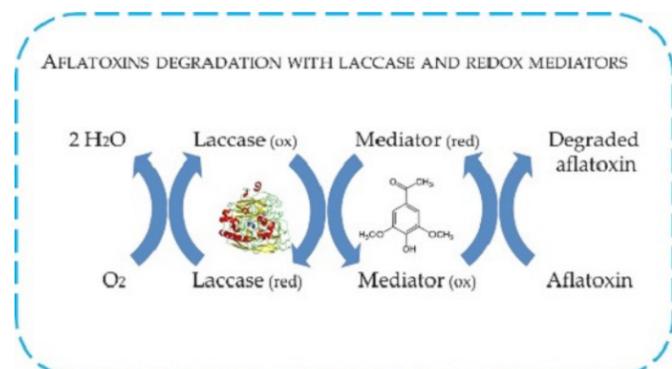


Figura 4. Mecanismo de degradación de aflatoxinas por la enzima lacasa en presencia de un mediador redox. Tomado y modificado de Peralta, 2017.

II.2 DEGRADACIÓN DE AFB1 POR LA ENZIMA Manganeso Peroxidasa (MnP)

Otra de las enzimas con potencial para llevar a cabo la biotransformación de AFB1 es la enzima Manganeso Peroxidasa (MnP) (EC1.11.1.13) esta enzima actúa catalizando la reacción de oxidación del ion manganeso (+2) a manganeso (+3) utilizando para ello peróxido de hidrógeno (H_2O_2), generando oxidantes no específicos los cuales juegan un papel importante al inicio de la degradación de la lignina. La enzima es una hemo proteína extracelular producida por basidiomicetos degradadores de madera podrida. Debido al tamaño de la molécula esta puede difundir en el complejo lignocelulósico compacto oxidando estructuras aromáticas mediante la formación de radicales lo que conduce a la ruptura de enlaces covalentes. El MnP tiene cinco isoenzimas, dentro de las más destacables se encuentran MnP1 y MnP2 reportada en diferentes hongos como *Nematoloma frowardii*, *Lentinula edodes*, *Pleurotus eryngii*, *Phanerochaete flavido-alba*, *Pleurotus ostreatus*, *Oxiporus latemarginatus* entre otros.

Estudios realizados por Wang (2011) examinó la capacidad de degradación de AFB1 por la enzima MnP de *P. sordida* YK-564, obteniendo porcentajes de descontaminación por arriba del 70% después de 48 hr, esta fue favorecida al adicionar Tween 80 ya que produce radicales de peróxido liberados de lípidos. Wang propone que AFB1 se oxida primero a AFB1-8, 9-epóxido por MnP y luego hidroliza a AFB1-8, 9-dihidrodiol (figura 5), logrando eliminar la actividad mutagénica de la AFB1, de esta forma la molécula se convierte en no tóxica.

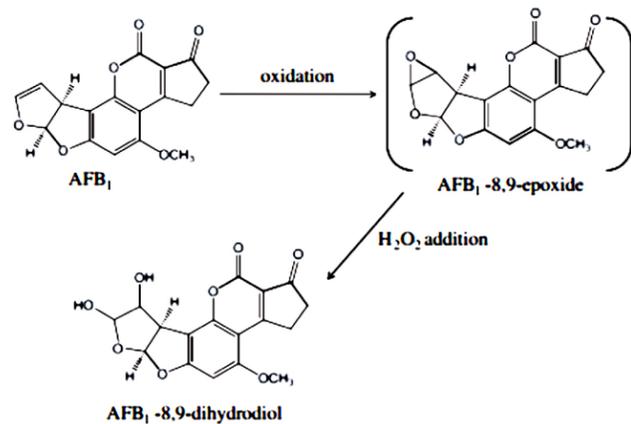


Figura 5. Mecanismo propuesto para la oxidación de AFB1 por MnP (Want, 2011).

III. PERSPECTIVAS

Sin lugar a dudas se requiere del uso de tecnologías innovadoras para minimizar la contaminación y exposición por aflatoxinas. En la actualidad el control biológico se está desarrollando para minimizar los efectos nocivos que causan los agentes químicos a corto mediano y largo plazo en su aplicación. Los hongos de pudrición blanca y particularmente ciertos metabolitos producidos por estos organismos con actividad antifungal pueden ser empleados en el control biológico de fitopatógenos. Por otra parte la aplicación de enzimas ligninolíticas para la degradación de aflatoxinas podría ser una importante medida empleada comercialmente durante el cultivo, el manejo postcosecha y durante el procesamiento del grano o para la descontaminación de alimentos ya procesados.

AGRADECIMIENTOS

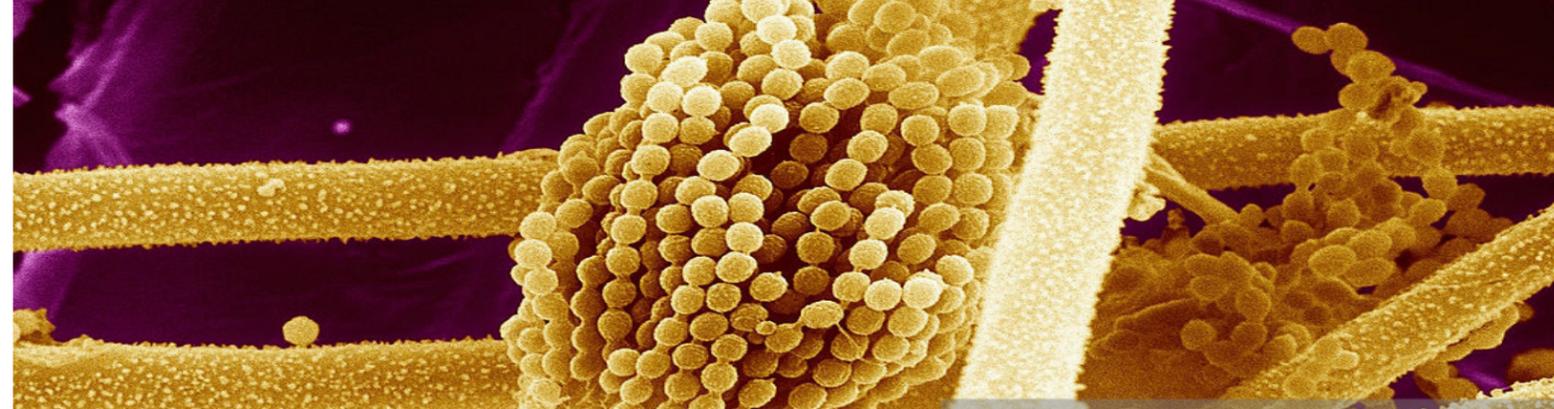
Al Instituto Politécnico Nacional proyecto SIP20172237 y al CONACyT por las becas otorgadas 598965 y 599292.

REFERENCIAS

Alberts JF, Gelderblom WCA, Botha A & van Zyl WH. 2009. Degradation of aflatoxin B1 by fungal laccase enzymes. *Int J Food Microbiol* 135: 47–52.

Anguiano, R. G. L. Verver, A., Cortina, V., Guzmán de P.D. 2005. Inactivation of aflatoxin B1 and aflatoxicol through traditional “nixtamalización” of corn and their regeneration by acidification of corn dough. *47 (5): 1-7.*

Bezalel L, Hadar Y, Fu PP, Freeman JP & Cerniglia C. 1996. Initial oxidation products in the metabolism of pyrene, anthracene, fluorine, and dibenzothiophene by the white rot fungus *Pleurotus ostreatus*. *Appl Environ Microb* 62: 2554–2559



Collins PJ, Kotterman MJ, Field JA & Dobson AW. 1996 Oxidation of anthracene and benzo[a]pyrene by laccases from *Trametes versicolor*. *Appl Environ Microb* 62: 4563–4567.

Hirai H, Nakanishi S & Nishida T. 2004. Oxidative dechlorination of methoxychlor by ligninolytic enzymes from white-rot fungi. *Chemosphere* 55: 641–645.

Idnurm, A., & Meyer, V. 2014. Welcome to Fungal Biology and Biotechnology. *Fungal Biology and Biotechnology*, 1:8.

Joshi DK & Gold MH. 1993 Degradation of 2,4,5-trichlorophenol by the lignin-degrading basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*. *Appl Environ Microb* 59: 1779–1785.

Kamei I, Suhara H & Kondo R. 2005 Phylogenetical approach to isolation of white-rot fungi capable of degrading polychlorinated dibenzo-p-dioxin. *Appl Microbiol Biot* 69: 358–366.

Kent Loeffler. Cornell University. Available from <http://www.plantpath.cornell.edu/PhotoLab/> [fecha de revisión 10 marzo 2017].

Liu, X., Li, H., Xu, Z., Peng, J., Zhu, S., & Zhang, H. 2013. Development of hyperbranched polymers with non-covalent interactions for extraction and determination of aflatoxins in cereal samples. *Analytica Chimica Acta*, 797:40-49.

Loi, M., Fanelli, F., Zucca, P., Liuzzi, VC, Quintieri, L., Cimmarusti, MT, Mulè, G. 2016. Aflatoxin B1 and M1 Degradation by Lac2 from *Pleurotus pulmonarius* and Redox Mediators. *Toxins*. 8 (9): 245-265

Ogawa N, Okamura H, Hirai H & Nishida T. 2004 Degradation of the antifouling compound Irgarol 1051 by manganese peroxidase from the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Chemosphere* 55: 487–491.

Peralta, R. M., Polacchine da Silva, B., Gomes Côrrea, R. C., Kato, C. G., Seixas, F. A., & Bracht, A. (2017). Enzymes from Basidiomycetes. Peculiar and Efficient Tools for Biotechnology. *Biotechnology of Microbial Enzymes*, 119-149.

Petersen, J. H. 2012. The Kingdom of fungi. New Jersey: FSC (online). Available from <http://www.plantpath.cornell.edu/PhotoLab/links.htm> [fecha de revisión 10 marzo 2017].

Scheidegger K. A. & Payne G. A. 2003. Unlocking the Secrets Behind Secondary Metabolism: A Review of *Aspergillus flavus* from Pathogenicity to Functional Genomics. *Journal of Toxicology: Toxin Reviews*. 22 (2-3): 423-459

Tamagawa Y, Hirai H, Kawai S & Nishida T. 2005. Removal of estrogenic activity of endocrine-disrupting genistein by ligninolytic enzymes from white rot fungi. *FEMS Microbiol Lett* 244: 93–98.

Udomkun, P., Wiredu, A. A., Nagle, M., Müller, J., Vanlauwe, B., & Bandyopadhyay, R. 2017. An empirical evaluation of three vibrational spectroscopic methods for detection of aflatoxins in maize. *Food Control*, 76:127-138.

Wang, J., Ogata, M., Hirai, H., & Kawagishi, H. 2011. Detoxification of aflatoxin B1 by manganese peroxidase from the white-rot fungus *Phanerochaete sordida* YK-624. *FEMS Microbiol Lett*, 314(2):164-169.

Weaver, U.-A. 2012. Mississippi state University Extension (online). Available from <http://extension.msstate.edu/news/feature-story/2012/corn-researchers-develop-field-aflatoxin-approach> [fecha de revisión 10 marzo 2017]

Yu, J., Bhatnagar, D., Ehrlich C. K. 2002. Aflatoxin biosynthesis. *Revista Iberoamericana de Micología*. 19:191-200



INVESTIGACIÓN +

POSGRADOS

- Maestría en Biotecnología Aplicada
- Maestría en Biotecnología Productiva
- Doctorado en Biotecnología Aplicada
- Doctorado en Biotecnología Productiva



Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada
Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal
Tecuexcomac - Tepetitla K. 1.5, Tlaxcala, C.P. 90700, México