

GENERACIÓN DE MONÓMEROS AROMÁTICOS POR *Aspergillus* Y *Penicillium* spp A PARTIR DE LIGNINA RESIDUAL DE PAJA DE TRIGO

AROMATIC MONOMERS GENERATION BY *Aspergillus* AND *Penicillium* SPP FROM RESIDUAL WHEAT STRAW LIGNIN

Eduardo BALTIERA-TREJO, MsC.^{1,4}; Liliana MÁRQUEZ-BENAVIDES, PhD^{1,2};
 Ma. del Consuelo HERNÁNDEZ-BERRIEL, PhD^{2,3}; Juan Manuel SÁNCHEZ-YÁÑEZ, PhD^{4*}

Recibido: Junio 11 de 2015 Aceptado: Marzo 9 de 2016

RESUMEN

Antecedentes: La paja de trigo es un residuo agrícola con un 17% de lignina, un polímero recalcitrante con potencial biotecnológico si se despolimeriza en aromáticos de interés para la industria; lo que es posible por métodos químicos, pero que son costosos y contaminantes. Una alternativa es su despolimerización biológica por hongos mitospóricos ligninolíticos como *Aspergillus* y *Penicillium* spp. Sin embargo existen pocos reportes del uso de hongos en la generación de aromáticos por despolimerización de la lignina de residuos agrícolas. **Objetivo:** Determinar la generación de aromáticos utilizando los hongos *Aspergillus* y *Penicillium* por despolimerización de la lignina residual de paja de trigo semipurificada. **Métodos:** Para ello los hongos se cultivaron en lignina residual de paja de trigo por 28 días, que por despolimerización generaron aromáticos que se identificaron en cromatografía de gases. **Resultados:** Los resultados mostraron que ambos hongos generan aromáticos como: guayacol 3,5, vainillina 3,3, ácidos hidroxibenzoico 3,2, vainillinico 3,3, siringico 10,1 y ferúlico 21,9 mg mL⁻¹. **Conclusiones:** *Aspergillus* y *Penicillium* son una opción ecológica en el aprovechamiento de la lignina residual de paja de trigo semipurificada para la generación de aromáticos de interés industrial, en un tiempo relativamente corto a partir de un residuo abundante y barato.

Palabras clave: ascomiceto, despolimerización, hongo, mitospórico, ligninolítico.

ABSTRACT

Background: Wheat straw is an agricultural waste, which contains 17% of lignin, a recalcitrant polymer with biotechnological potential provided it is depolymerized. Lignin depolymerization has attracted interest because it yields aromatics of industrial interest; chemical and physical methods are available but entail economic and environmental constraints. An alternative is to exploit the ligninolytic capacity of mitosporic fungi, such as *Aspergillus* and *Penicillium* spp. There are few reports on the use of these funguses in the generation of aromatics by lignin depolymerization. **Objectives:** To use *Aspergillus* and *Penicillium*

¹ Laboratorio de Residuos Sólidos y Medio Ambiente del Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales IIAF, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo UMSNH, 58302 Morelia-México.

² Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología aplicada al Estudio de los Residuos Sólidos SOMERS A.C. Av. Cuauhtemoc 403, Col. Roma Norte, Delegación Cuauhtemoc, 06700 México D.F.-México.

³ Instituto Tecnológico de Toluca 52149, Metepec, Edo. de México-México.

⁴ Laboratorio de Microbiología Ambiental del Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas IIQB, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo UMSNH, 58040 Morelia-México

* Autor a quien se debe dirigir la correspondencia: syanez@umich.mx

spp in the biological generation of aromatics from semipurified residual wheat straw lignin. **Methods:** Funguses were grown in semipurified residual wheat straw lignin for 28 days; produced aromatics were followed using gas chromatography. **Results:** Obtained results indicate a range of aromatics produced, i.e. 3,5 mg mL⁻¹ guaiacol, 3,3 vanillin, 3,2 hydroxybenzoic acid, 3,3 vanillinic, 10,1 syringic and 21,9 ferulic. **Conclusions:** *Aspergillus* and *Penicillium* represent an ecological option in the exploit of semi-purified residual lignin from wheat straw to generate aromatics in a shorter period from an abundant and cheap residue.

Keywords: Ascomycete, depolymerization, fungus, mitosporic, ligninolytic.

INTRODUCCIÓN

El trigo (*Triticum aestivum* L.) es uno de los principales cultivos agrícolas en el mundo, con una producción de 675 x 10⁹ kg año⁻¹ (1), en consecuencia como subproducto se estima se generan 877 x 10⁹ kg de paja (2), eliminada comúnmente por incineración “*in situ*”, con un impacto ambiental negativo por la emisión de gases: CO₂, NO₂, SO₂ y O₃ (3, 4). La paja de trigo se compone de un 35% de celulosa, 26% de hemicelulosas y 17% de lignina (5). Actualmente la celulosa y las hemicelulosas se extraen por tratamiento fisicoquímico para su conversión en bioetanol (6), pero la lignina es un residuo recalcitrante sin alternativas de aprovechamiento biotecnológico (7).

La lignina residual de paja de trigo (LIREPATO) está compuesta por polímeros de fenilpropanoides que podrían ser fuente para la obtención de aromáticos de interés en la industria farmacéutica y alimenticia (8), una vez que se han eliminado la celulosa y las hemicelulosas. Ejemplo de estos aromáticos son la vainillina (4-hidroxi-3-metoxibenzaldehído) saborizante de mayor consumo mundial con producción de 10 x 10⁶ kg año⁻¹ (9); el guayacol (*o*-metoxifenol) usado como expectorante; el ácido ferúlico (3-(4-hidroxi-3-metoxifenil)-2-propenoico) un antiinflamatorio, antioxidante y bloqueador solar; el ácido hidroxibenzoico (salicílico) precursor de aspirinas, conservador de alimentos, dentífricos y repelentes de insectos (10).

Comercialmente los aromáticos se generan por síntesis química a partir de derivados del petróleo (7), o por el tratamiento ácido o alcalino de lignina de madera proveniente del proceso kraft para la fabricación de pulpa de celulosa (8, 11) pero estos procesos son costosos y contaminantes. Una alternativa ambientalmente segura para su generación es por la despolimerización biológica de la lignina empleando basidiomicetos (12) y los hongos mitosporicos ligninolíticos (HML) (13). Aunque han

sido poco investigados, se ha reportado que ciertos HML tienen análoga o superior capacidad en la degradación de lignina que los basidiomicetos, como Chan (14) que reportó un 28% mayor capacidad de despolimerización de lignina con *Fusarium moniliforme*, comparado con *Phanerochaete chrysosporium*.

Además son pocos los trabajos en los que se aprovecha la capacidad de los HML en la despolimerización de lignina para la generación de monómeros aromáticos y generalmente se enfocan en la transformación de intermediarios como del ácido ferúlico a vainillina; mientras que el aprovechamiento de la LIREPATO en la producción de aromáticos únicamente se ha descrito por métodos físico-químicos. Con base en lo anterior, el objetivo de esta investigación fue utilizar a los HML *Aspergillus* y *Penicillium* spp para la generación de aromáticos por despolimerización de LIREPATO semipurificada.

MATERIAL Y MÉTODOS

Preparación de la LIREPATO

A partir de paja de trigo por tratamiento ácido térmico se eliminó una fracción de la celulosa y las hemicelulosas con lo que se obtuvo LIREPATO semipurificada. Para ello se empleó paja de trigo seca previamente molida y tamizada en una criba de 0,0841 mm, se trató por aspersión con CH₃-COOH (ácido acético) al 10% (v/v) por 30 min en relación 1:2 (p/v), luego se neutralizó con NaOH (hidróxido de sodio) al 10% (p/v) y después se sometió a tratamiento térmico a 120° C por 60 min. Finalmente se lavó con agua destilada y secó a 70° C por 24 h. Se caracterizó el contenido de lignina por el método de extracción con solventes orgánicos con equipo Soxhlet de acuerdo a Sun (15) y precipitación de lignina con ácido sulfúrico (72% v/v) de acuerdo a Runkel (16); el contenido de celulosa y hemicelulosas se realizó por digestión con NaClO₂ (clorito de sodio) de acuerdo con el método de Wise (17).

Activación de *Aspergillus* spp y *Penicillium* spp

De la colección del Laboratorio de Microbiología Ambiental del Instituto de Investigaciones Químico Biológicas de la UMSNH Morelia, Michoacán se emplearon las cepas de HML *Penicillium chrysogenum* AT3 y AT4; *Aspergillus fumigatus* AT11 y *A. tubigensis* AT12.

Estos HML se activaron en agar-LIREPATO con la siguiente composición química (g L^{-1}): LIREPATO 10,0; peptona de caseína 5,0; extracto de levadura 1,3; K_2HPO_4 0,17; KH_2PO_4 2,61; MgSO_4 1,5; NaCl 0,9; CuSO_4 0,05; además se añadió indicador de pH azul de bromotimol 10,0 ppm; 2,5 mL de detergente Roma® al 10% (p/v), agar 18 g L^{-1} y 1,0 mL L^{-1} de solución de oligoelementos que se preparó con la siguiente composición química (g L^{-1}): H_3BO_3 2,86; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,22; $\text{MnCl}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1,81; KMnO_4 0,09. Finalmente se ajustó el pH del agar-LIREPATO a 5,5 y se esterilizó a 121°C por 20 min (18).

Ambos HML se sembraron en cajas de Petri con agar LIREPATO e incubaron a 30°C por 5 días. Luego el micelio de cada HML se separó con 15,0 mL de solución salina-detergente estéril cuya composición es: 12,0 mL NaCl 0,85% y 3,0 mL detergente Roma® 0,01%, y enseguida se removió con asa bacteriológica y finalmente el micelio suspendido se colectó con una pipeta estéril.

A continuación, se inocularon 12,5 mL de micelio de cada HML en matraces Erlenmeyer de 500 mL con 250 mL de caldo LIREPATO con la siguiente composición química (g L^{-1}): LIREPATO 10,0; peptona de caseína 5,0; extracto de levadura 1,3; K_2HPO_4 0,17; KH_2PO_4 2,61; MgSO_4 1,5; NaCl 0,9; CuSO_4 0,05 azul de bromotimol 10,0 ppm; 2,5 mL de detergente al 10% (p/v), y 1,0 mL L^{-1} de solución de oligoelementos (g L^{-1}): H_3BO_3 2,86; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,22; $\text{MnCl}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1,81; KMnO_4 0,09; se ajustó el pH a 5,5 que se esterilizó a 121°C/20 min. Estos matraces se incubaron en aerobiosis en un agitador rotatorio por 28 días a 30°C y 150 rpm. Luego se tomó una muestra de 10,0 mL de cada matraz a los 7, 14, 21, 28 días para identificar y cuantificar los aromáticos derivados de la despolimerización de la LIREPATO.

El diseño experimental fue aleatorio simple y empleó cinco tratamientos: cuatro hongos más un control sin inocular, con tres réplicas por tratamiento.

Despolimerización de la LIREPATO

La despolimerización de la LIREPATO por los *Aspergillus* spp y *Penicillium* spp se determinó a los 28 días de incubación, para ello el caldo LIREPATO se filtró por succión al vacío y el remanente sólido se lavó con agua destilada, se secó a 70°C por 24 h, se enfriaron en desecador por 4 horas y se pesaron a peso constante para calcular el porcentaje de despolimerización por la pérdida de masa de las mismas: % despolimerización = $100 (\text{peso inicial} - \text{peso final}) / \text{peso inicial}$. Se analizaron tres replicas por tratamiento.

Cuantificación de los aromáticos

Para extraer los aromáticos del caldo LIREPATO después de su despolimerización con HML, se tomaron 5,0 mL que se centrifugaron a 8000 rpm (5000 g) por 15 min (Universal 320 R Hettich), el sobrenadante se ajustó a un pH de 2,0 con HCl concentrado (37% p/p), se agregó NaCl a saturación y 5,0 mL de acetato de etilo concentrado; entonces se inyectó 1,0 μL de muestra en un cromatógrafo de gases (Varian CP-3800®), equipado con una columna capilar de fennilmetilpolisiloxano de 30 m x 0,53 mm, el gas acarreador N_2 se mantuvo con un flujo de 35,0 mL/min; la temperatura del horno, inyector y detector FID fueron de 90, 270 y 300 °C, respectivamente. Se usó como patrón de los aromáticos una mezcla estándar de los ácidos hidroxibenzoico, vanilínico, ferúlico y siríngico, así como de vainillina y guayacol en concentración de cada uno de 1,0, 0,5, 0,1 y 0,05 mg mL^{-1} disueltos en acetato de etilo (19, 20), las mediciones se realizaron por triplicado. Los datos experimentales se analizaron con la prueba de Tukey, con un nivel de significancia del 5% con el programa JMP 8.0 (SAS®).

RESULTADOS

Se realizó una cinética de despolimerización de LIREPATO durante 28 días de cultivo con *Aspergillus* y *Penicillium* spp. Como variables respuesta se determinó el porcentaje de despolimerización y se realizó la cuantificación de aromáticos producto de la despolimerización.

Caracterización de la lignina residual de paja de trigo

La paja de trigo se sometió a tratamiento ácido-térmico para semipurificarla, con el que el contenido total de celulosa y hemicelulosas disminuyó de

un 67,4 a un 33,3% (p/p), debido a la degradación de los polímeros. El contenido de la lignina de la paja antes del tratamiento era de 21,3% y después fue de 49,8% (Tabla 2), por lo que se consideró a la LIREPATO como semipurificada.

Despolimerización de la LIREPATO

P. chrysogenum AT4 mostró la mayor despolimerización de LIREPATO de 34,8% en 28 días, seguido de *A. fumigatus* AT11 con un 29,1%; ambos valores estadísticamente superiores a los registrados en *P. chrysogenum* AT3 y *A. tubigensis* AT12 (Figura 1).

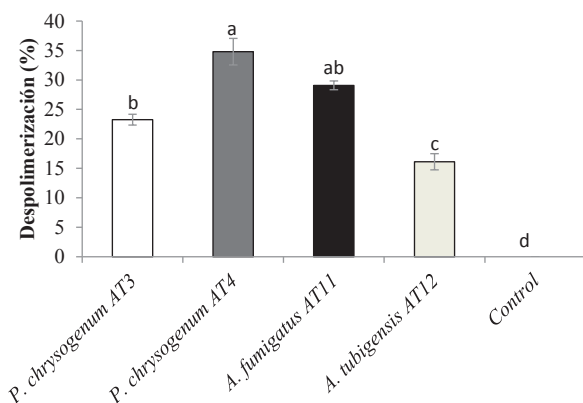


Figura 1. Porcentaje de despolimerización de lignina residual de paja de trigo (LIREPATO) por *Aspergillus* spp. y *Penicillium* spp. El control es medio LIREPATO sin inocular. Las líneas corresponden a la desviación estándar de tres mediciones. Las letras indican diferencia estadística con un nivel de significancia $\alpha=0,05$.

Cuantificación de aromáticos

Se identificaron 6 monómeros aromáticos a partir de la despolimerización de la LIREPATO. Las 4 cepas de HML produjeron ácido ferúlico desde la primera semana de crecimiento, el que generó la mayor concentración fue *P. chrysogenum* AT3 con 21,9 mg mL⁻¹ en la semana 3. *A. tubigensis* AT12 produjo hasta 10,1 mg mL⁻¹ de ácido sirínico en la

semana 2. *A. fumigatus* AT11 generó 3,3 mg mL⁻¹ de ácido vainillínico en la semana 3. *P. chrysogenum* AT3 produjo 3,3 mg mL⁻¹ de vainillina hasta la semana 4, este aromático se generó a partir de la segunda semana por las 4 cepas de HML. *P. chrysogenum* AT4 fue el único que generó ácido hidroxibenzoico con 3,2 mg mL⁻¹ en la semana 2. Mientras que *P. chrysogenum* AT3 produjo 3,5 mg mL⁻¹ de guayacol en la semana 3 (Figura 2).

En el análisis de la producción acumulada de aromáticos durante las 4 semanas de crecimiento en la despolimerización de LIREPATO (Figura 3) se observó que *P. chrysogenum* AT3 tuvo la mayor producción de aromáticos, seguido por *P. chrysogenum* AT4 que fue la única cepa que generó los 6 tipos de aromáticos durante la cinética. Los aromáticos que se produjeron en mayor proporción fueron el ácido ferúlico y el sirínico.

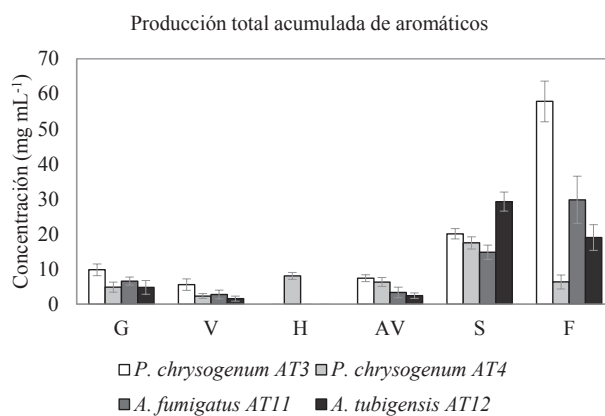


Figura 3. *Aspergillus* spp y *Penicillium* spp en la síntesis de aromáticos derivados de la despolimerización de lignina residual de paja de trigo (LIREPATO). G-Guayacol, V-Vainillina, H-ácido p-hidroxibenzoico, AV-ácido vainillínico, S-ácido sirínico, F-ácido ferúlico. En los controles no se detectaron aromáticos. Las líneas verticales corresponden a la desviación estándar de tres mediciones. Nivel significancia $\alpha=0,05$.

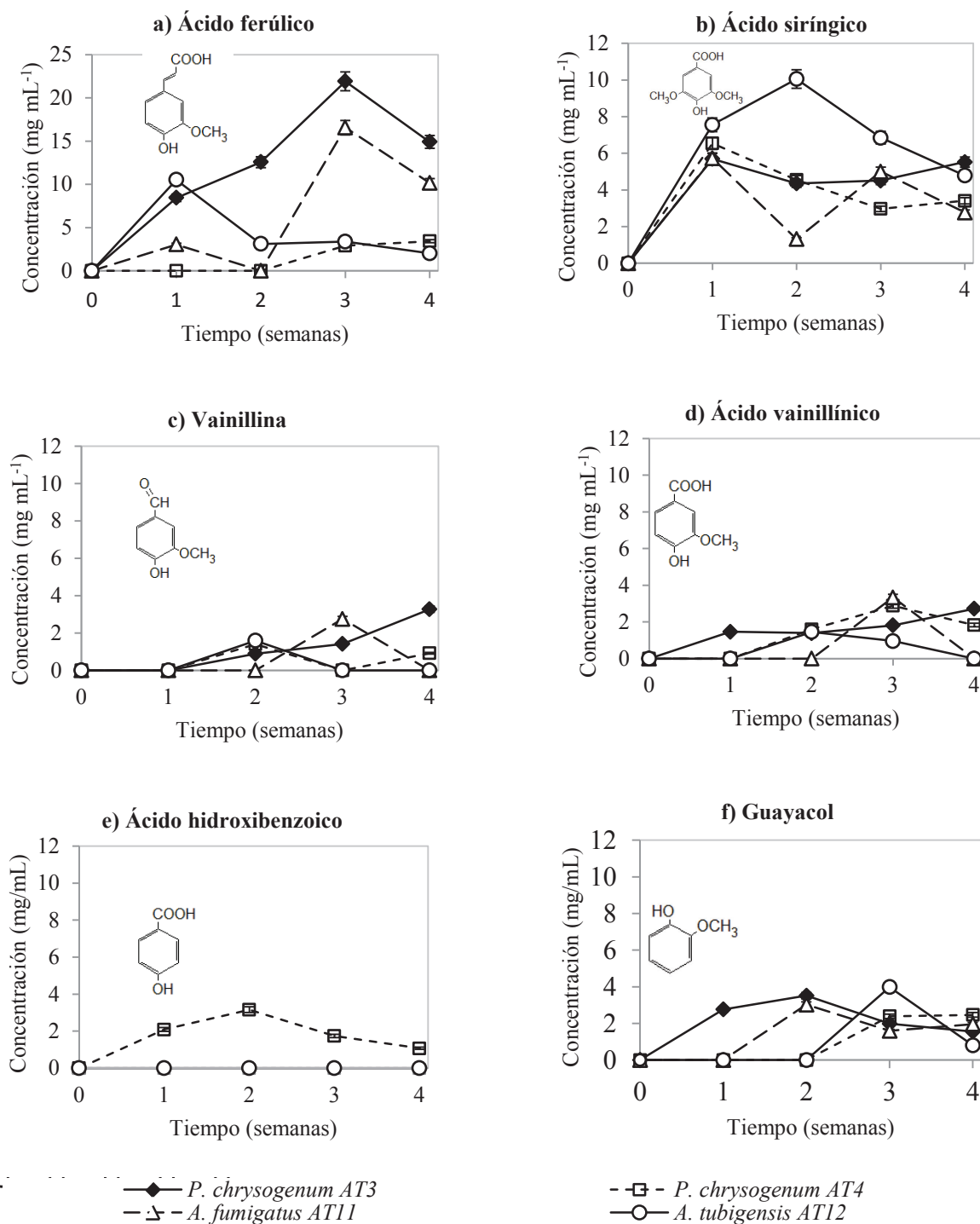


Figura 2. Cinética de la obtención de aromáticos por *Aspergillus* spp y *Penicillium* spp en la despolimerización de LIREPATO. En controles no se detectaron aromáticos. Las líneas verticales corresponden a la desviación estándar de tres mediciones. Significancia $\alpha=0,05$. Notese que en la gráfica “a” la escala es diferente al resto.

DISCUSIÓN

Los resultados mostraron que tanto *Aspergillus* como *Penicillium spp* tiene potencial para la obtención de aromáticos guayacol, vainillina, ácidos hidroxibenzoico, vainillinico, siríngico y ferúlico en un tiempo relativamente corto.

Los HML estudiados generaron ácido ferúlico durante las 4 semanas de ensayo y en mayor cantidad que los otros aromáticos, con base a los reportes en la literatura se considera que durante la despolimerización de la LIREPATO semipurificada se producirá primero ácido ferúlico y luego a partir de su transformación se derivaran otros aromáticos como el ácido vainillinico, la vainillina y el guayacol (21).

Aunque está reportado que *Aspergillus* y *Penicillium spp* son eficaces en la degradación de la lignina (13, 22), no se ha descrito su capacidad en la producción de aromáticos a partir de pajas agrícolas ya que los estudios se han enfocado principalmente en basidiomicetos y en la transformación de aromáticos intermediarios. Por ejemplo con *Trametes versicolor* a partir de ácido ferúlico se generó alcohol veratrílico y veratrilaldehído (23), mientras que con *Pycnoporus cinnabarinus* se liberó vainillina con un rendimiento de 0,064 mg mL⁻¹ en 7 días (9). Por otro lado, con el HML *Paecilomyces variotii* de ácido ferúlico se produjo ácido vainillínico, vainillina, alcohol vainillínico y 4 vinil-guayacol (24).

En general la obtención de aromáticos se ha estudiado principalmente a partir de lignina procedente de procesos kraft, mientras de pajas agrícolas existen solo algunos reportes pero sin un tratamiento previo de purificación para eliminar la celulosa y las hemicelulosas. Lesage-Meessen (25) con *Pycnoporus cinnabarinus* en rastrojo de maíz y 20 g L⁻¹ de maltosa produjeron 0,767 mg mL⁻¹ de vainillina en 8 días de cultivo. Granda (26) con *Lentinus crinitus* en la degradación 5,0 g de residuo de hoja de plátano (*Musa paradisiaca*) generaron ácido ferúlico, vainillina, ácido vainillínico y eugenol en concentración de 0,6, 0,04, 0,6 y 254 mg mL⁻¹. Estos valores en basidiomicetos fueron menores a lo registrado por los géneros y especies de *Aspergillus* y *Penicillium spp* de este trabajo (Tabla 1), pero al no tenerse las mismas condiciones de cultivo, es

necesario contar con investigaciones futuras para afirmar que estos HML tienen mayor capacidad de generación de aromáticos que los basidiomicetos. Mientras que los valores superiores en la generación de aromáticos también pueden explicarse por el uso de LIREPATO semipurificada, lo que aceleró la degradación de la lignina en aromáticos, al disminuir la concentración de carbohidratos.

En el caso de paja de trigo no se encontraron antecedentes sobre la obtención de aromáticos por HML o basidiomicetos, pero si por despolimerización química como se describe en Tapin (27) con una producción de 2 mg g⁻¹ de ácido ferúlico, 1,5 de coumárico, 0,30 de vainillina y 0,25 de ácido vainillínico; estos resultados fueron similares a los obtenidos en esta investigación, pues en función del peso de la LIREPATO se tuvo una producción de guayacol con 0,35, vainillina 0,33, ácidos hidroxibenzoico 0,32, vainillínico 0,33, siríngico 1,01 y ferúlico 2,19 mg g⁻¹ de LIREPATO semipurificada. Estos resultados apoyan que la opción biotecnológica genera aromáticos de manera similar a la lograda con métodos químicos y sin liberar residuos tóxicos al ambiente (28).

Utilizar la capacidad de *Aspergillus* y *Penicillium spp* en la generación de aromáticos daría valor agregado a la LIREPATO semipurificada. Se estima que el valor potencial de los aromáticos es de US\$10-15 kg⁻¹ con un mercado de 260 x 10⁶ kg año⁻¹ (7, 8). De acuerdo con Viñals-Verde (29) la obtención biotecnológica de aromáticos podría ser más rentable que la síntesis química, sin embargo se requiere mayor investigación al respecto, por ejemplo, en optimizar las condiciones de cultivo y demanda nutricional de los HML empleados para incrementar la producción de aromáticos.

Finalmente consideramos que son factores importantes para continuar con esta investigación con miras a su potencial escalamiento industrial: a) la obtención de aromáticos a partir de materia prima abundante, renovable y de bajo costo; b) la creciente demanda de productos orgánicos como alternativa a los de síntesis química; c) la conversión biológica de LIREPATO en aromáticos disminuiría los costos de producción de etanol a partir de celulosa; d) en contraste la síntesis química de aromáticos es compleja, costosa y con liberación de residuos contaminantes (7, 8, 30).

Tabla 1. Comparativo de la producción de compuestos aromáticos en investigaciones reportadas en la literatura.

Hongo	Sustrato	Aromáticos	Tiempo	Fuente
<i>Penicillium chrysogenum</i>	lignina de paja de trigo	ácido vainillínico 1,5 mg mL ⁻¹ guayacal 2,76 mg mL ⁻¹ ácido siríngico 5,7 mg mL ⁻¹ ácido ferúlico 8,4 mg mL ⁻¹	7 días	Esta investigación
<i>Lentinus crinitus</i>	Plátano (<i>Musa paradisiaca</i> L.)	ácido ferúlico 0,6 mg mL ⁻¹ vainillina 0,04 mg mL ⁻¹ ácido vainillínico 0,6 mg mL ⁻¹ eugenol 254 mg mL ⁻¹	16 días	Granda (26)
<i>Pycnoporus cinnabarinus</i>	ácido ferúlico extraído de rastrojo de maíz	vainillina 0,767 mg mL ⁻¹	8 días	Lesage-Mcessen (25)
<i>Pycnoporus cinnabarinus</i>	ácido ferúlico	vainillina 0,064 mg mL ⁻¹	7 días	Lomascolo (9)
Síntesis química	lignina de paja de trigo	ácido ferúlico 2 mg g ⁻¹ ácido coumárico 1,5 mg g ⁻¹ vainillina 0,30 mg g ⁻¹ ácido vainillínico 0,25 mg g ⁻¹	----	Tapin (27)

Los datos de esta investigación se ajustaron a la semana 1 para compararlos con los otros reportes experimentales.

CONCLUSIONES

Para la demanda de aromáticos en el mercado se propone la LIREPATO extraída a partir de un residuo abundante, barato y recalcitrante. Con base a los resultados, se concluye que *Aspergillus* spp y *Penicillium* spp son una opción ambientalmente segura en el aprovechamiento de la LIREPATO semipurificada para la obtención de aromáticos de interés biotecnológico, en un tiempo relativamente corto.

Limitaciones del presente estudio

La detección de compuestos aromáticos por la despolimerización de la LIREPATO con géneros y especies de HML fue relativamente alta; sin embargo es necesario continuar la investigación para explotar su potencial aprovechamiento industrial, ya que aun se desconocen las condiciones y costos de ese escalamiento. La potencial aplicación del método de semipurificación de la LIREPATO es en este punto limitada, ya que se ignora el resultado con una lignina de otra fuente vegetal diferente a esta gramínea. La idoneidad de los resultados tendrá que compararse con los basidiomicetos conocidos y con otros hongos mitosporicos, para medir objetivamente la capacidad de *Aspergillus* y *Penicillium* utilizados en esta investigación.

Trabajos futuros deberán tomar en cuenta las enzimas ligninolíticas sintetizadas con los compuestos aromáticos durante la despolimerización de la LIREPATO, y evitar las reacciones secundarias de despolimerización y/o incluso de polimeriza-

ción de los monómeros generados. Finalmente, las sucesivas investigaciones tendrán que avanzar con el empleo de mejores técnicas de extracción y purificación de los compuestos aromáticos producto de la despolimerización biológica de la LIREPATO.

AGRADECIMIENTOS

Al Proyecto 150001 SENER-CONACYT, al CONACYT por la BECA 239180, al proyecto 2.7 (2016) de la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores manifestamos que no se tiene ningún interés comercial o asociativo que represente un conflicto de intereses con los resultados del artículo.

REFERENCIAS

1. FAOSTAT [Internet]. Food and Agriculture Organization of the United Nations 2012. Available from: <http://faostat.fao.org>.
2. Talebnia F, Karakashev D, Angelidaki I. Production of bioethanol from wheat straw: An overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation. *Bioresour Technol*. 2010;101(13):4744-4753.
3. Li LJ, Wang Y, Zhang Q, Li JX, Yang XG, Jin J. Wheat straw burning and its associated impacts on Beijing air quality. *Sci China Ser D*. 2008;51(3):403-414.
4. Quintero-Núñez M, Moncada-Aguilar A. Contaminación y control de las quemadas agrícolas en Imperial, California, y Mexicali, Baja California. *Reg Soc*. 2008;20(43):3-24.
5. Xu F, Sun J-X, Sun R, Fowler P, Baird MS. Comparative study of organosolv lignins from wheat straw. *Ind Crop Prod*. 2006;23(2):180-193.

6. Dashtban M, Schraft H, Syed TA, Qin W. Fungal biodegradation and enzymatic modification. *Int J Biochem Mol Biol.* 2010;1(1):36-50.
7. Chávez-Sifontes M, Domine ME. Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Av Cienc Ing.* 2013;4(4):15-46.
8. Gosselink R. Lignin as a renewable aromatic resource for the chemical industry. Wageningen, Nederland: Wageningen University; 2011.
9. Lomascolo A, Stentelaire C, Asther M, Lesage-Meessen L. Basidiomycetes as new biotechnological tools to generate natural aromatic flavours for the food industry. *Trends Biotechnol.* 1999;17(7):282-289.
10. Howard R, Abotsi E, Rensburg E, Howard S. Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production. *Afr J Biotechnol.* 2004;2(12):602-619.
11. Ibrahim M, Balakrishnan R, Shamsudeen S, Adam F, Bhawani S. A concise review of the natural existence, synthesis, properties, and applications of syringaldehyde. *BioResources.* 2012;7(3).
12. Ferraz A, Durán N. Lignin degradation during softwood decay by the ascomycete *Chrysomya sitophila*. *Biodegradation.* 1995;6(4):265-274.
13. Milstein O, Haars A, Sharma A, Vered Y, Shragina L, Trojanowski J, et al. Lignin degrading ability of selected *Aspergillus* Spp. *Appl Biochem Biotechnol.* 1984;9(4):393-394.
14. Chang A, Fan J, Wen X. Screening of fungi capable of highly selective degradation of lignin in rice straw. *IntBiodeter Biodegr.* 2012;72(0):26-30.
15. Sun R, Tomkinson J, Zhu W, Wang SQ. Delignification of maize stems by peroxymonosulfuric acid, peroxyformic acid, peracetic acid, and hydrogen peroxide. 1. physicochemical and structural characterization of the solubilized lignins. *J Agric Food Chem.* 2000;48(4):1253-1262.
16. Runkel ROH, Witt H. Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. *Holz Roh Werkst.* 1953;11(12):457-461.
17. Wise LE, Murphy M, D'Addicco AA. Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on the hemicelluloses. *Pap Trade J.* 1946;122(2):35-42.
18. Sánchez-Yáñez JM. Breve Tratado de Microbiología Agrícola Teoría y Práctica. Morelia, Michoacán México: Corporativo de Desarrollo Sustentable, Centro de Investigación y Desarrollo de Michoacán, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Secretaría de Desarrollo Rural en Michoacán; 2007. 130-133 pp.
19. Wu FJ, Moreno J, Vela GR. Growth of *Azotobacter vinelandii* on soil nutrients. *Appl Environ Microbiol.* 1987;53(3):489-494.
20. Valenciaga D, Herrera RS, Simoes EO, Chongo B, Torres V. Composición monomérica de la lignina de *Pennisetum purpureum* v. Cuba CT-115 y su variación con la edad de rebrote. *Rev Cubana Cienc Agr.* 2009;43(3):315-319.
21. Buranov AU, Mazza G. Lignin in straw of herbaceous crops. *Ind Crop Prod.* 2008;28(3):237-259.
22. Zeng G, Yu H, Huang H, Huang D, Chen Y, Huang G, et al. Laccase activities of a soil fungus *Penicillium simplicissimum* in relation to lignin degradation. *World J Microb Biot.* 2006;22(4):317-324.
23. Nishida A, Fukuzumi T. Formation of coniferyl alcohol from ferulic acid by the white rot fungus *Trametes*. *Phytochem.* 1978;17(3):417-419.
24. Rahouti M, Seigle-Murandi F, Steiman R, Eriksson K-E. Metabolism of ferulic acid by *Paecilomyces variotii* and *Pestalotia palmarum*. *Appl Environ Microbiol.* 1989;55(9):2391-2398.
25. Lesage-Meessen L, Lomascolo A, Bonnin E, Thibault J-F, Buleon A, Roller M, et al. A biotechnological process involving filamentous fungi to produce natural crystalline vanillin from maize bran. *Appl Biochem Biotechnol.* 2002;102-103(1-6):141-153.
26. Granda D, Mejía A, Jiménez G. Utilización de residuos de plátano para la producción de metabolitos secundarios por fermentación en estado sólido con el hongo *Lentinus crinitus*. *Vitae.* 2005;12(2):13-20.
27. Tapin S, Sigoillot J-C, Asther M, Petit-Conil M. Feruloyl Esterase Utilization for Simultaneous Processing of Nonwood Plants into Phenolic Compounds and Pulp Fibers. *J Agric Food Chem.* 2006;54(10):3697-3703.
28. Arora D, Sharma RK, Chandra P. Bidelignification of wheat straw and its effect on in vitro digestibility and antioxidant properties. *IntBiodeter Biodegr.* 2011;65(2):352-358.
29. Viñals-Verde M, Bell-García A, Michelena-Álvarez G, Ramil-Mesa M. Obtención de etanol a partir de biomasa lignocelulósica. *ICIDCA.* 2012;46(1):7-16.
30. González-García Y, González-Reynoso O, Nungaray-Arellano J. Potencial del bagazo de Agave tequilero para la producción de biopolímeros y carbohidrasas por bacterias celulolíticas y para la obtención de compuestos fenólicos. *e-Gnosis.* 2005;3:1-18.