

BIODEGRADACIÓN DE RESIDUOS URBANOS LIGNOCELULÓSICOS POR *Pleurotus*

Irma DELFÍN-ALCALÁ¹ y Carmen DURÁN-DE-BAZÚA²

¹Carrera de Biología. FES Iztacala, UNAM, Tlalnepantla 54020 Edo. de México, México

²Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Facultad de Química, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510 D.F., México

(Recibido febrero 2002, aceptado febrero 2003)

Palabras clave: hongos celulolíticos, pasto, pañales, biodegradación

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo reducir la masa de dos desechos de tipo urbano que contienen celulosa y lignina, como la parte celulósica de los pañales y la poda del pasto común, al utilizarlos como sustrato para el cultivo de dos tipos de hongos celulolíticos identificados como variedades clara y oscura de *Pleurotus* spp. obtenidas comercialmente. Estos hongos son organismos que tienen la capacidad de degradar la celulosa y la lignina. Como materiales de comparación se utilizaron, algodón industrial, con casi 100 % de su masa como celulosa, y paja de trigo, muy usada en el cultivo comercial de estos hongos. Se adicionaron dos residuos que se considera funcionan como enriquecedores en la degradación de residuos celulósicos, posos de café y penachos de piña. La reducción en masa, tanto en los sustratos que contenían pasto como en los que contenían paja, solos y con penacho de piña y posos de café, fue superior al 80 %; correspondiendo la mayor reducción a la etapa de colonización del sustrato (primeras cuatro semanas). Estos resultados indican que la mayor parte de la materia orgánica original fue mineralizada y liberada al ambiente en forma de CO₂ y vapor de agua. En el pañal desechable, el material polimérico superabsorbente representó un obstáculo para la colonización y degradación de la parte celulósica por lo que, a las cuatro semanas, estos experimentos se suspendieron. Los resultados muestran que la degradación de la celulosa presente en estos residuos sólidos por el hongo *Pleurotus* se beneficia con la presencia de los penachos de piña, indicando un posible efecto sinérgico de la lignina.

Key words: cellulolytic mushrooms, garden grass, diapers, biodegradation

ABSTRACT

This research is focused to the mass reduction of two urban lignocellulosic materials, the cellulose part of soiled diapers and the gardens grass residues, when used as substrates for the cultivation of two *Pleurotus* spp. strains from commercial origin. These fungi are organisms that have the ability to degrade cellulose and lignin. As a comparison, two additional substrates were considered, industrial cotton with almost 100 % of its mass formed by cellulose, and wheat straw, widely used for the commercial production of these fungus. Spent coffee grain and pineapple crown, two residues that literature identifies as "improvers" in the degradation of cellulosic residues, were added. Mass reduction for grass and wheat straw residues either alone or combined with coffee spent grain and pineapple crown were higher than 80 %; corresponding the highest reduction to the substrate colonization stage (first four weeks). These results indicate that most of the original organic matter was mineralized and liberated to the environment as CO₂ and water vapor. For soiled diapers, the superabsorbent polymeric material was an obstacle for colonization and degradation of the cellulosic fraction, and after the fourth week these

experiments were suspended. These results show that cellulose degradation by *Pleurotus* in the studied substrates is mainly improved by the pineapple crown, indicating a possible synergic effect of the lignin.

INTRODUCCIÓN

Entre los residuos sólidos generados en las ciudades, cerca de 40 % son materiales celulósicos o lignocelulósicos que, en su mayoría, no reciben tratamiento alguno, como los pañales desechables usados y el pasto cortado de los jardines. El componente mayoritario de los pañales desechables es la celulosa, un biopolímero cuya lenta degradación hace que permanezca durante años casi sin alteración en los rellenos sanitarios y en otros sitios de disposición final. En 1992, Nava y Espinosa cultivaron el hongo *Pleurotus* spp. en pañales desechables usados como sustrato. El experimento condujo a resultados prometedores en cuanto a la reducción de masa del sustrato y a la producción de setas comestibles, aunque los autores indicaron la necesidad de realizar nuevos experimentos, modificando las condiciones de cultivo, para mejorar la eficiencia del proceso de degradación de la porción celulósica del pañal desechable.

Al diseñar nuevos experimentos se deben considerar los cambios ocurridos en la composición de los pañales desechables, posteriores a esos primeros ensayos. Uno de los más importantes es que, actualmente, los pañales incluyen en su composición alrededor de 10 %, en masa, de un polímero sintético responsable de la gran capacidad de absorción de los fluidos corporales, el “poliacrilato de sodio”, material que se convierte en gel al retener de 200 a 300 veces su peso de agua. El incremento en la capacidad de absorción permitió a los fabricantes reducir el peso unitario del pañal y, por consiguiente, el contenido neto de celulosa. En 1992-94, los pañales desechables pesaban alrededor de 70 g y contenían 84 % de celulosa, en tanto que los pañales desechables actuales pesan de 35 a 55 g y contienen entre 50 y 60 % de celulosa (Delfin-Alcalá *et al.* 2001, Delfin-Alcalá 2002).

La celulosa es un componente mayoritario de la madera y otras fibras vegetales, cadenas poliméricas que al ser hidrolizadas liberan unidades de glucosa. Asociadas con las fibras celulósicas hay hemicelulosas, que son polímeros de azúcares distintos a la glucosa, básicamente xilosas y manosas (Eyzaguirre 2000). La hidrólisis de celulosa y hemicelulosa depende de la estructura de la que forman parte, de los monómeros que las conforman y del tipo de enlace entre ellos (Hadar *et al.* 1992).

En la naturaleza, el deterioro (pudrición) de los materiales celulósicos es causado por la actividad metabólica de un número limitado de ascomicetos y hongos imperfectos, organismos que degradan simultáneamente una

reducida fracción de la lignina. Se han citado diversos hongos celulolíticos, como *Aspergillus*, *Candida*, *Cyathus*, *Fusarium*, *Hypoxylon*, *Phanerochaeta*, *Stemphyllium*, *Trichoderma* y bacterias que pueden también degradar la celulosa, como *Actinomyces*, *Angiococcus*, *Bacillus*, *Cellulomonas*, *Corynebacterium*, *Streptomyces*, entre otras (Dunlop y Chang 1980).

En los vegetales, además de celulosa y hemicelulosa está presente la lignina, que es el segundo compuesto regenerable más abundante en la Tierra. Se trata de un compuesto que no sólo es recalcitrante a la degradación, sino que además, su estructura reticular tridimensional de anillos aromáticos enlazados por átomos de oxígeno, obstaculiza el acceso de las enzimas hidrolíticas hacia las fibrillas celulósicas. La biotransformación de la lignina es un proceso clave en el geociclo del carbono, proceso metabólico realizado por mecanismos oxidantes extracelulares. Los organismos más eficientes como degradadores de la lignina son los “hongos de la pudrición blanca” (Higuchi 1990).

En esta investigación se propuso como objetivo, la reducción de la masa global de dos residuos celulósicos de tipo urbano, los desechos de jardinería, en particular la poda de pasto y el material celulósico de los pañales desechables, para lo cual se ensayó el cultivo de *Pleurotus* spp. sobre los dos residuos mencionados y mezclas de los mismos con penachos de piña o con posos de café (conocidos también como café lavado o café extraído). Como materiales de referencia se usaron la paja de trigo y la fibra de algodón.

MATERIALES Y MÉTODOS

Cepas

La “semilla” de dos variedades de *Pleurotus* “clara” y “oscura”, fue suministrada por un cultivador comercial de este hongo.

Sustratos

Se utilizaron pañales desechables usados, poda de pasto, café lavado (posos) y penachos de piña, solos y combinados, además de paja de trigo y de fibra de algodón industrial, como testigos. El pasto común (cortado y seco) se colectó en las áreas de jardín de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala de la UNAM, en el Estado de México. Los pañales desechables usados, pero sólo con residuos líquidos, fueron proporcionados directamente por las madres. Éstos se fragmentaron con

TABLA I. DISEÑO EXPERIMENTAL. CODIFICACIÓN, SUSTRATOS E INÓCULOS EN CADA TRATAMIENTO

Sustrato (250 g de peso seco)	Inóculo (25 g de semilla de trigo invadida con micelio)					
	<i>Pleurotus spp.</i> variedad oscura			<i>Pleurotus spp.</i> variedad clara		
	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
Algodón	API-1	API-2	API-3	API-4	API-5	API-6
Algodón + piña 1:1	AC-1	AC-2	AC-3	AC-4	AC-5	AC-6
Algodón + café 1:1	Sin inóculo	Sin inóculo				
Testigo						
Pasto	Ps-1	Ps-2	Ps-3	Ps-4	Ps-5	Ps-6
Pasto + piña 1:1	PsPi-1	PsPi-2	PsPi-3	PsPi-4	PsPi-5	PsPi-6
Pasto + café 1:1	PsC-1	PsC-2	PsC-3	PsC-4	PsC-5	PsC-6
Testigo	Sin inóculo	Sin inóculo				
Paja	Pj-1	Pj-2	Pj-3	Pj-4	Pj-5	Pj-6
Paja + piña 1:1	PjPi-1	PjPi-2	PjPi-3	PjPi-4	PjPi-5	PjPi-6
Paja + café 1:1	PjC-1	PjC-2	PjC-3	PjC-4	PjC-5	PjC-6
Testigo	Sin inóculo	Sin inóculo				
Pañal	Pñ-1	Pñ-2	Pñ-3	Pñ-4	Pñ-5	Pñ-6
Pañal + piña 1:1	PñPi-1	PñPi-2	PñPi-3	PñPi-4	PñPi-5	PñPi-6
Pañal + café 1:1	PñC-1	PñC-2	PñC-3	PñC-4	PñC-5	PñC-6

tijeras, a un tamaño de partícula de aproximadamente 2 cm de longitud, con objeto de homogeneizarlos, permitir un mejor manejo y facilitar la exposición del material celulósico al inóculo. Se determinó el contenido promedio de humedad de cada material para calcular la cantidad equivalente a 250 g de sustrato, en base seca. El peso calculado, de cada material y de cada mezcla, se colocó en bolsas de polipapel y se le agregó la cantidad de agua necesaria para tener 80 % de humedad. Las bolsas con los sustratos fueron esterilizadas durante 15 minutos a 121 °C.

Diseño experimental

Se hizo un diseño multifactorial (Tabla I), con los sustratos básicos (residuos y testigos): algodón (A), paja (Pj), pasto (Ps) y residuo de pañal (Pñ). Esos materiales fueron acondicionados solos y combinados, 1:1 en peso, con dos materiales que se considera funcionan como *enriquecedores* del sustrato: *café lavado* (C) y penachos de piña (Pi). El carácter de *enriquecedor* se asigna a la pulpa de café (Guzmán *et al.* 1993), pero debido a que en las zonas urbanas no se dispone de este residuo, en el experimento se le sustituyó por café lavado, desecho que al igual que la pulpa de café contiene nitrógeno no proteínico. En cuanto al penacho de piña, algunos investigadores han obtenido eficiencias biológicas elevadas al mezclar ciertos sustratos con este desecho, aparentemente por su alto contenido de lignina (Bautista *et al.* 1998). De los tres primeros sustratos, A, Pj, Ps, se mantuvo un testigo sin inoculación, para determinar la posible degradación espontánea por organismos contaminantes presentes en el ambiente.

Condiciones ambientales

El experimento se realizó en un laboratorio del Área de Procesos y Medio Ambiente de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, en la Ciudad de México, en el periodo comprendido entre los meses de junio a septiembre de 2000. Los parámetros ambientales registrados en la etapa de crecimiento micelial fueron, temperaturas entre 17 y 18 °C y humedad relativa entre 64 y 70 %, y en la etapa de fructificación, temperaturas de 17 a 20 °C, con humedad relativa de 58 a 70 %. La humedad relativa favorable para la fructificación, se mantuvo con el funcionamiento durante 24 horas de un humidificador de tipo doméstico. En esa misma etapa, para favorecer el intercambio gaseoso, se hizo funcionar de manera intermitente (dos o tres veces al día, durante 15 a 30 minutos en cada sesión), un ventilador doméstico de aspas.

Acondicionamiento de los sustratos, inoculación y cultivo de *Pleurotus spp.*

La Unión de Cultivadores de Setas del Estado de México suministró, para este estudio, semilla de trigo invadida con dos variedades de *Pleurotus*, identificadas por ellos como “oscura” y “clara” (por el color de los hongos). Una vez preparadas las bolsas con sustrato, fueron inoculadas bajo condiciones asépticas. La mitad de las bolsas se inoculó con la variedad “oscura” y la otra con la variedad “clara”, en proporción de 10 % del peso seco de sustrato. Cada tratamiento se montó por triplicado, identificándose las unidades experimentales por la inicial de sus componentes y un número progresivo. Los números 1, 2 y 3 correspondieron a sustratos inoculados con la variedad

oscura y los marcados con 4, 5 y 6, con la variedad clara (Tabla I).

El residuo de pañal desechable no se ajustó al mismo contenido de humedad que los demás sustratos, debido a que desde el inicio era heterogéneo y, aún después de fragmentarlo, no se obtuvo un material de composición uniforme. La humedad estaba distribuida irregularmente y el promedio era superior al 200 %, por lo que, a estos sustratos, no se les adicionó agua y se les manejó con su contenido de humedad original. Se consideró la posibilidad de secar previamente el material, pero los ensayos realizados no fueron exitosos debido a que el tiempo requerido era muy prolongado, se desprendían olores desagradables y había infestación por insectos.

Para el cultivo se siguieron las técnicas descritas por Guzmán *et al.* (1993) y Gaitán-Hernández *et al.* (2002), con la diferencia de que los sustratos no fueron pasteurizados sino esterilizados, con el propósito de eliminar posibles riesgos de infección por patógenos humanos que pudieran asociarse con el manejo del residuo de pañal desechable. Las bolsas se cerraron herméticamente para prevenir contaminaciones y evitar la pérdida de humedad. Como testigos se utilizaron bolsas sin inocular de cada sustrato, incluyendo la paja.

Etapa 1: Crecimiento micelial

Las bolsas recién inoculadas se distribuyeron al azar en los anaqueles de la cámara de cultivo ($t=0$). Los cultivos se mantuvieron en oscuridad durante las primeras dos semanas, ayudados por una cubierta negra. Al término del periodo de oscuridad se sustituyó la cubierta negra por otra de plástico transparente y con un bisturí esterilizado, se hicieron perforaciones a las bolsas, para permitir el intercambio gaseoso y disminuir la concentración de CO_2 en la masa micelial; las bolsas se mantuvieron durante dos semanas bajo condiciones de iluminación natural. La técnica de Guzmán *et al.* (1993) señala que durante la etapa de colonización, conviene mantener concentraciones elevadas de CO_2 para inhibir el desarrollo de hongos competidores, pero una vez que el sustrato ha sido invadido por *Pleurotus* se debe favorecer la aireación para aumentar la concentración de oxígeno, elemento clave en el proceso de degradación de la lignina. Al finalizar la primera etapa de cultivo ($t=4$ semanas), las bolsas con pasto mostraban un grado de invasión superior al 70 %, mientras que en las de pañal desechable, el porcentaje de invasión era muy reducido.

Etapa 2: Fructificación

Al terminar la etapa de invasión (4 semanas), las bolsas se abrieron por completo para propiciar el libre intercambio gaseoso y mantener un ambiente aerobio en el interior del sustrato, favoreciendo el desarrollo de primordios. Esta segunda etapa se prolongó por 12 semanas y concluyó con la cosecha de los hongos. Las bolsas

se mantuvieron en un periodo de luz-oscuridad de 12 x 12 horas, con riego diario por aspersión, para mantener la humedad anteriormente citada.

Cosecha

Los hongos se cosecharon cuando sus bordes tendían a cambiar de cóncavos a convexos. Se registró el peso fresco de los hongos cosechados por día, de cada una de las muestras.

Análisis fisicoquímicos

Las determinaciones analíticas de humedad, cenizas y nitrógeno Kjeldahl se hicieron conforme a las técnicas estándar (AOAC 1995). La fibra y sus diferentes fracciones (hemicelulosa, celulosa y lignina) se analizaron por el método de Goering van Soest (1970), citado por Tejada (1983), en el que las fracciones individuales se determinan por las diferencias de peso del material insoluble, antes y después de cada tratamiento. El contenido de carbono orgánico se calculó conforme a la NMX AA67-1985 (SEDUE 1985). Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

Muestras

Muestras homogéneas pequeñas de cada componente identificable visualmente en un pañal nuevo de marca comercial, fueron separadas mecánicamente y analizada su composición elemental. La composición del polímero superabsorbente no se determinó debido a que a simple vista se apreciaba que estaba “contaminado” con partículas diminutas. No se descarta que alguno de los otros materiales también hubiera estado contaminado. El análisis de los componentes se hizo en el laboratorio del PIQAYQA de la Facultad de Química de la UNAM, utilizando un analizador elemental Carlo Erba Modelo 200 equipado con graficador. Este instrumento permite conocer la composición elemental de muestras muy pequeñas (1 a 3 mg) de materiales cuya composición sea homogénea.

La composición de los sustratos no homogéneos se determinó al inicio de la etapa experimental ($t=0$ semanas), sobre muestras del material, previamente secadas a 105 °C. La humedad se calculó a partir de la diferencia de peso entre las muestras antes y después de ser llevadas a peso constante. Las determinaciones realizadas a las muestras secas fueron: contenidos de cenizas, de nitrógeno orgánico Kjeldahl y de lignina, celulosa, hemicelulosa y minerales insolubles. Al finalizar el periodo de invasión por el micelio del hongo ($t=4$ semanas), se determinó en las unidades que contenían pasto como sustrato: masa total (húmeda), contenidos de humedad, cenizas y nitrógeno orgánico Kjeldahl. Las últimas determinaciones analíticas se hicieron a esos mismos sustratos al finalizar el periodo de fructificación y cosecha ($t=16$ semanas), midiéndose: masa total (húmeda), humedad,

TABLA II. COMPOSICIÓN INICIAL PROMEDIO DE LOS SUSTRATOS EMPLEADOS EN ESTE ESTUDIO

Material	Peso seco %	Cenizas %	Nitrógeno %	Celulosa %	Lignina %
Algodón	71.32±0.05	3.68±0.01	1.17±0.03	88.00±0.91	0.0
Paja	84.66±0.40	3.20±0.12	4.30±0.07	36.60±0.65	13.60±0.30
Pasto	89.27±0.20	9.23±0.16	14.43±0.05	32.00±0.15	5.80±0.20
Piña	25.91±0.12	3.43±0.04	4.94±0.03	30.00±0.35	43.00±0.37
Café	80.01±0.06	8.10±0.20	1.32±0.06	1.20±0.15	24.00±0.12
Pañal desechable*					
Semilla var. oscura	38.94±0.	404.06±0.15	3.04±0.06	7.80±0.26	12.50±0.25
Semilla var. clara	31.77±0.28	4.94±0.12	2.11±0.05	8.00±0.20	10.60±0.29

Los datos mostrados corresponden a la media de tres determinaciones ± la desviación estándar

* La muestra no era homogénea. Se determinó la composición elemental de un pañal desechable nuevo, ver **Tabla III**

contenidos de cenizas, de nitrógeno orgánico Kjeldahl y de lignina, celulosa, hemicelulosa y minerales insolubles. Se determinó la masa húmeda de las setas cosechadas por unidad experimental, así como el peso seco y el contenido de nitrógeno orgánico Kjeldahl de las mismas.

Tratamiento de datos

Los datos analíticos obtenidos en las pruebas fisicoquímicas (peso total, nitrógeno, fibra neutro detergente y sus fracciones: hemicelulosa, celulosa, lignina y minerales) se ajustaron a *base seca*, considerando el contenido de humedad de cada material. Las mediciones se hicieron al inicio de la etapa experimental (t=0) y después del crecimiento del hongo (t=16 semanas).

La reducción de masa expresa, en cada etapa, la biodegradación del sustrato, entre el momento de la inoculación (t=0 semanas) y el fin de la etapa de invasión (t=4 semanas) o de la fructificación y cosecha (t=16 semanas).

El contenido de carbono orgánico se determinó conforme a lo establecido en la norma oficial NMX AA67-1985 (SEDUE 1985). El *factor* que se utilizó fue 0.46, valor obtenido al considerar el contenido promedio de carbono en los materiales presentes en los sustratos: biomasa C₃H₇O₂NP_{0.2} (Manahan 2000) y celulosa (C₁₂H₂₂O₁₁). De acuerdo con la norma técnica referida, el contenido de carbono orgánico se calculó como:

$$\% \text{ de materia orgánica} = \text{peso seco} - \text{cenizas} \quad (1)$$

$$\% \text{ carbono orgánico} = \% \text{ de materia orgánica} \times \text{factor} \quad (2)$$

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó un diseño de ANDEVA por bloques completamente aleatorios ($\alpha = 0.05$). Los cálculos fueron procesados con la hoja de cálculo Excel, versión Office 2000.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los análisis de la composición inicial de los materiales en estudio se encuentran en las **tablas II y III**. Los porcentajes de reducción global de masa de los sustratos se presentan en la **figura 1**. La **tabla IV** muestra el porcentaje de lignina (de las muestras que fueron tomadas en forma periódica de los sustratos) y las relaciones celulosa:lignina al inicio y final de los experimentos. La **tabla V** ilustra los porcentajes de reducción de peso de los sustratos, por etapa de cultivo y tipo de inóculo. La **tabla VI** registra las fracciones de hemicelulosa, celulosa y lignina de cada uno de los sustratos en estudio, en la fases inicial y final y, el porcentaje de degradación.

En el presente estudio se observó que en ninguno de los sustratos ensayados hubo diferencias significativas de

TABLA III. COMPOSICIÓN DE LOS MATERIALES DE UN PAÑAL DESECHABLE

Material	Nitrógeno %	Carbono %	Hidrógeno %	Oxígeno*	Fórmula mínima
Fibra algodón (celulosa)	*0.76±0.09	44.47±0.06	8.53±0.05	46.99	C ₆ H ₁₃ O ₅
Tela azul (polipropileno)	*1.56±0.07	87.33±0.05	21.94±0.08	0.00	C ₃ H ₉
Tela blanca (polipropileno)	*1.16±0.07	79.21±0.04	19.66±0.03	0.00	C ₃ H ₈
Plástico (polietileno)	*1.23±0.02	78.23±0.07	19.80±0.05	0.00	C ₂ H ₅
Esponja (poliuretano)	5.78±0.03	59.41±0.02	10.21±0.08	24.61	C ₁₃ H ₂₆ O ₄ N

Los datos mostrados corresponden a la media de tres determinaciones ± la desviación estándar

*El oxígeno se calculó por diferencia, sin tomar en cuenta el pequeño porcentaje de nitrógeno en los compuestos que por su naturaleza no contienen este elemento

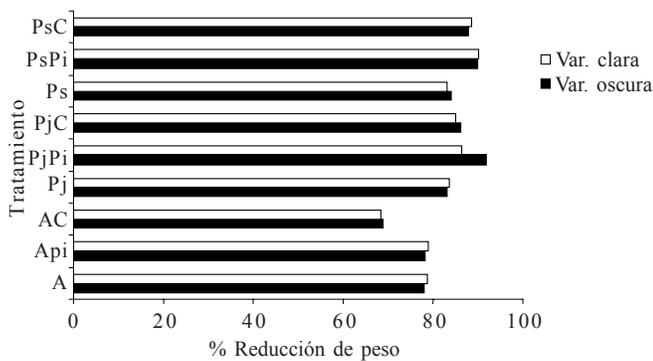


Fig. 1. Reducción total de masa en porcentaje entre el inicio y el final de los experimentos con los sustratos en estudio empleando hongos de las variedades clara y oscura, A: Algodón, A-Pi: Algodón-piña, A-C: Algodón-café, Pj: Paja, Pj-Pi: Paja-piña, Pj-C: Paja-café, Ps: Pasto, Ps-Pi: Pasto-piña, Ps-C: Pasto-café

TABLAIV. PORCENTAJE DE LIGNINA Y PROPORCIONES CELULOSA:LIGNINA AL INICIO Y AL FINAL DE LOS EXPERIMENTOS EN LOS SUSTRATOS EN ESTUDIO

Sustrato	Porcentaje de lignina	Relación inicial celulosa:lignina	Relación final celulosa:lignina
Algodón	0.09	927.25*	17.00* ↓
Algodón-piña	12.16	17.82	25.20 ↑
Algodón-café	1.74	22.98	8.84 ↓
Paja	12.43	2.70	4.20 ↑
Paja-piña	9.43	5.00	4.12 ↓
Paja-café	7.93	4.27	4.79 ↑
Pasto	5.34	5.51	1.66 ↓
Pasto-piña	5.89	4.84	2.38 ↓
Pasto-café	4.39	3.47	2.59 ↓

*Prácticamente celulosa pura

↓Baja la proporción celulosa:lignina

↑ Sube la proporción celulosa:lignina

pérdida de peso, en función de la variedad de *Pleurotus* inoculada. Para las dos variedades, la reducción de peso fue significativamente mayor durante la etapa de invasión o colonización del micelio que durante la etapa de fructificación (Tabla V), lo que se puede atribuir a la utilización de los materiales más fácilmente degradables. La paja de trigo es posiblemente el residuo vegetal que se utiliza en México con mayor frecuencia para el cultivo comercial de *Pleurotus*. Esta paja y la poda de pasto de jardín comparten algunas características físicas, pero difieren en su rigidez que, en el caso de la paja, posibilita la existencia de espacios para el intercambio gaseoso y en su capacidad de retener humedad. En cuanto a su composición (Tabla II), el pasto contiene porcentajes más elevados de nitrógeno (14.4 %) que la paja (4.3 %). Dichas diferencias no afectan las eficiencias de degradación

(Figura 1), que son prácticamente iguales. En la tabla V puede apreciarse que, aunque al final tienen una pérdida similar de masa, en la primera etapa el pasto lo hace con mayor eficacia.

En la tabla IV se observan los datos obtenidos de las relaciones lignina:celulosa para los sustratos estudiados. Los contenidos de celulosa y lignina reportados por diferentes autores, para un mismo material, difieren significativamente, lo cual se comprende al revisar el método que se utiliza para su cuantificación. El contenido de cada componente se mide por la diferencia de solubilidad de “hemicelulosa”, “celulosa” y “lignina” en soluciones ácidas y oxidantes, bajo condiciones estandarizadas de tiempo y temperatura. Pero, variaciones, aún ligeras, en el tamaño de partícula de las muestras sometidas a ebullición y en el tiempo efectivo de calentamiento (antes, durante y después de la ebullición) pueden afectar el resultado del análisis. No menos importante es la composición efectiva de cada “componente”, ya que hemicelulosa, celulosa y lignina no son moléculas de composición y estructura definidas, sino polímeros de estructura compleja, cuyo tamaño, constituyentes y tipo de enlaces son específicos en cada parte y especie vegetal, así como de las condiciones a que los materiales hayan estado sujetos antes de su acondicionamiento como sustratos. En estos experimentos, por ejemplo, hay una pequeña variación entre los valores de lignina de las muestras tomadas para la caracterización de los lotes y la muestra inicial de cada experimento (0 vs. 0.09 % para algodón, 13.6±0.30 vs. 12.43 % para paja, 5.80±0.20 vs. 5.34 % para pasto), así como para el valor final en el algodón (1.25 y 1.74 g, 0.005 y 0.007 %, inicial vs. final, respectivamente).

El contenido de celulosa y lignina, no muestra correlación con la pérdida de peso, pero sí la hay entre la razón celulosa:lignina y la reducción de peso. El coeficiente de correlación entre esos parámetros es 77 y 81 %, respectivamente, para las variedades oscura y clara.

En el caso de la hemicelulosa, parece que hubiera cierta relación entre su porcentaje y la degradación del sustrato, el coeficiente de correlación porcentual es de 61 y 54 %, respectivamente, para las variedades oscura y clara. El término “hemicelulosa” no es muy preciso, desde el punto de vista químico, ya que hace referencia a la fracción de la fibra cruda que se disuelve por ebullición en una solución ácida de detergente. Se considera que incluye cadenas lineales y ramificadas de monosacáridos distintos a la glucosa, cadenas polipeptídicas y fracción de las cadenas celulósicas de bajo peso molecular, componentes relativamente fáciles de degradar y de aportar energía para la oxidación de la lignina. Esta suposición apoya los resultados que muestran que los sustratos degradados en mayor proporción son los que contienen mayor porcentaje de hemicelulosa (Tabla VI).

Pleurotus es un hongo que tiene la capacidad de degradar tanto la celulosa como la lignina. En los sustratos

TABLA V. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE PESO DE LOS SUSTRATOS POR ETAPA DE CULTIVO

Reducción de peso	Variedad	Sustratos								
		Algodón			Paja			Pasto		
		c/piña	c/café	%	c/piña	c/café	%	c/piña	c/café	%
Primera etapa: en 4 semanas	Oscura	76.68±3.54	50.58±6.85	54.98±3.50	39.62±12.79	77.57±3.04	77.94±5.86	63.23±7.13	83.23±3.04	78.14±4.62
	Clara	71.01±0.01	63.20±0.05	61.01±0.05	59.05±0.07	76.51±0.07	74.28±0.08	72.80±0.11	81.86±0.06	85.45±0.04
Segunda etapa: en 12 semanas	Oscura	1.38± 1.88	27.59±7.81	13.99±3.45	43.4± 14.32	14.43±5.02	8.18±4.41	20.94±10.23	6.67± 2.11	9.66± 5.34
	Clara	7.79± 0.52	15.68±2.43	7.43± 3.41	24.37±11.93	9.82± 5.11	10.73±4.73	10.34±2.68	8.18± 0.79	3.15± 1.77
Total: en 16 semanas	Oscura	78.06±1.77	78.17±1.66	68.97± 0.49	83.09±2.25	92.00±1.64	86.06±2.08	84.17±1.95	89.90±0.98	87.80±1.17
	Clara	78.80±0.06	78.88±0.02	68.44± 0.19	83.42±0.09	86.33±0.03	85.01±0.09	83.14±0.02	90.04±0.01	88.60±0.05

con concentraciones más altas de lignina (8-12 %), con excepción del sustrato paja-piña, se favoreció la degradación selectiva de este componente en comparación con la hidrólisis de la celulosa. En los sustratos con contenidos bajos de lignina (0.1-8 %) hubo mayor degradación de la celulosa. Esta degradación diferencial se observa fácilmente en la relación celulosa:lignina encontrada en los sustratos al inicio y al final del experimento.

Bisk'o y Bilay (1992), en un estudio realizado sobre tres sustratos, encontraron que no había relación directa entre la razón celulosa:lignina y la degradación del sustrato por *Pleurotus ostreatus*. El orden de degradación encontrado correspondió a la siguiente secuencia, de mayor a menor: residuo de girasol (celulosa:lignina = 1.17), paja de trigo (celulosa:lignina = 1.64) y paja de lino (celulosa:lignina = 0.78).

Es interesante observar las diferencias que la metodología y el propio sustrato marcan. Por ejemplo, para la paja de trigo, en este trabajo se obtuvo un valor de 2.7, mientras que dichos investigadores reportan 1.64. Naturalmente, cada variedad de trigo tiene proporciones diferentes de sus componentes por lo que esta información es de carácter genérico pero no definitorio.

La energía potencial de la lignina es mayor que la de la celulosa pero, aparentemente, los hongos no pueden utilizar la lignina como fuente de carbono o energía, la oxida-

ción de la molécula de lignina requiere un cosustrato, como fuente alterna de energía (Hadar *et al.* 1992). En experimentos *in vitro*, Higuchi (1990) encontró que, para degradar 5 mg de lignina se requieren, como fuente inmediata de energía, 100 mg de glucosa. Pese a su difícil degradación, la presencia de cierta clase de lignina parece ser importante en sustratos lignocelulósicos. Por ejemplo, en los tres sustratos enriquecidos con corona de piña, la degradación de la lignina fue mayor que en los mismos sustratos sin enriquecer, resultado que ya había sido descritos por otros autores (Guzmán-Dávalos *et al.* 1987a,b, Wang *et al.* 2001). La lignina presente en el “café lavado” parece no tener el mismo efecto positivo.

Pañal desechable

Las unidades que contenían pañales desechables como sustrato presentaron problemas y fueron retiradas del experimento, cuando habían transcurrido cuatro semanas. La colonización del sustrato era muy limitada, poco menos del 10 %. Las limitaciones en la colonización por el micelio del hongo pueden deberse al exceso de humedad y a la presencia del material gelificado que obstaculizaba el intercambio gaseoso y la oxigenación del cultivo. Sin embargo, los resultados obtenidos en la fibra de algodón confirman que la celulosa, componente mayoritario del pañal desechable, es un sustrato adecuado para el cultivo

TABLA VI. CONTENIDO DE LAS FRACCIONES DE FIBRA CRUDA A t=0 (INICIAL) Y A t=16 SEMANAS (FINAL) EN LOS LOTES QUE INICIALMENTE TENÍAN 250 g (b.s.)

Fracción		A			Tratamiento					
		A	APi	AC	Pj	PjPi	PjC	Ps	PsPi	PsC
Hemicelulosa	Inicial (g)	17.32	59.81	31.70	90.00	96.19	68.11	97.32	99.77	71.67
	Final (g)	7.89	3.89	7.61	2.50	1.36	5.16	7.22	6.18	5.20
	% degradación	54.45	93.50	75.99	97.22	98.59	92.42	92.58	93.81	99.64
Celulosa	Inicial (g)	221.1	148.63	112.15	92.65	130.13	93.64	81.15	78.65	42.13
	Final (g)	32.57	40.30	40.24	9.29	5.98	8.60	2.86	1.82	1.70
	% degradación	85.27	72.88	64.06	89.97	95.40	90.82	96.70	97.69	95.97
Lignina	Inicial (g)	1.25	5.97	4.81	34.21	25.96	21.84	14.71	16.23	12.10
	Final (g)	1.74	1.60	4.55	2.21	1.45	1.79	1.06	0.76	0.66
	% degradación	0.00	73.20	5.40	93.54	94.41	91.80	92.79	95.32	94.55

de *Pleurotus* y que se pueden lograr resultados más adecuados si se le mezcla con materiales de desecho que mejoren su estructura física y aporten lignina y nitrógeno orgánico. Este último elemento puede ser incorporado al sustrato naturalmente, en forma de urea y otros compuestos presentes en la orina y heces del bebé. Los datos del análisis elemental (**Tabla III**) se podrán emplear para corroborar, en estudios posteriores, la degradación de los materiales poliméricos por métodos de oxidación avanzada (De la Cabada-Islas *et al.* 2000).

Pasto

En los experimentos en que se utilizó pasto como sustrato lignocelulósico, la conversión de la materia orgánica a CO₂ y agua en fase de vapor dio una reducción importante de masa, 90.9 % para la variedad oscura y 89.6 % para la variedad clara, lo que indica que la mayor parte de la materia orgánica presente fue mineralizada y liberada al ambiente (su bioconversión a biomasa fúngica fue baja, de 26.2 y 11.6 g de setas frescas por 100 g de sustrato seco, para la variedad oscura y para la variedad clara, respectivamente). La muestra testigo sin inocular mostró reducción de masa inferior a 5 %.

CONCLUSIONES

Aunque hay algunos factores que muestran relación directa o indirecta con la degradación de los sustratos utilizados, estos hallazgos son indicadores y pueden servir de guía pero no se deben considerar como condicionantes absolutos, ya que esta investigación reafirmó que la degradación de los sustratos por los hongos del género *Pleurotus* está sujeta a la influencia de múltiples factores, entre ellos, actividad enzimática, disponibilidad de oxígeno, composición del sustrato, interacción de micelio y sustrato, genotipos de la cepa, condiciones ambientales y estadio morfogénico del cultivo (Bisk'o y Bilay 1992).

Actualmente una fracción menor de desechos de poda es sometida al tratamiento de composta, pero el resto se descarga en los sitios de disposición final de basura, lo que dificulta su degradación natural, dado que se acumula en pilas carentes de ventilación (oxigenación) que pudieran facilitar su degradación. En esos sitios se pueden ver, durante años, los restos de estos residuos de jardinería.

Desde el punto de vista del cuidado del ambiente, la minimización del pañal desechable representa un reto dado que no se dispone de un tratamiento para los grandes volúmenes que son generados diariamente. En estudios anteriores con este sustrato, los resultados fueron alentadores, pero aún se debe trabajar sobre los factores que, al modificar la composición del residuo, evitaron que el material celulósico fuera degradado por el hongo. De resolverse la interferencia debida a la presencia del poliacrilato

de sodio, podría reducirse más de 50 % de las casi mil toneladas diarias de pañales desechables que se generan (González-del-Carpio 2000).

De estos resultados se concluye que hay una posible correlación entre la presencia de lignina y la degradación de materiales residuales celulósicos (del tipo del pasto). Los resultados no permiten obtener conclusiones de la posible degradación del material celulósico del pañal desechable debido a que la presencia del material superabsorbente obstaculizó la colonización del micelio de *Pleurotus*. Se planea ensayar, en experimentos futuros, la separación del polímero o su degradación previa empleando sistemas fotolíticos (luz solar y agentes oxidantes como el agua oxigenada).

REFERENCIAS

- AOAC (Association of Official Analytical Chemists) (1995). *Official methods of analysis*. 15 ed. Washington.
- Bautista J.M., Franco B.L, Martínez S.G, Gamiño S.Z. y Ocaña C.R. (1998). Valor nutritivo de setas *Pleurotus ostreatus*, cultivadas en desechos de aguacate y piña. *Acta Universitaria, Instituto de Ciencias Agrícolas de Irapuato* 8, 52-65.
- Bis'ko N. A. y Bilay V. T. (1992). The growth of *Pleurotus ostreatus* on lignocellulosic materials. *Micol. Neotrop. Appl.* 5, 49-57.
- De la Cabada-Islas F., Durán-de-Bazúa C., Estrada-Gasca C., Geissler G. y Ríos-Enríquez M.A. (2000). Estudio comparativo para las reacciones de oxidación con TiO₂ y el reactivo de Fenton en la degradación de dodecilsulfonato de sodio. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)* 15, 23-31.
- Delfin-Alcalá I., Durán-de-Bazúa M.C., Espinosa R.M. y Mata B.I.P. (2001). Estudio de factores que afectan la biodegradación de desechos urbanos celulósicos. *Memorias de la División de Química Ambiental, XXXVI Congreso Mexicano de Química. Soc. Quím. de México, México D.F.*, pp. 64-70.
- Delfin-Alcalá I. (2002). Estudios de biodegradación de residuos lignocelulósicos: pasto, paja, algodón y residuo celulósico de pañal desechable. Tesis de Maestría en Ciencias Químicas (Química Ambiental). UNAM. México D.F.
- Dunlop L. y Chang Ch.S.T. (1980). Cellulose degradation. En: *Utilization and recycle of agricultural wastes and residues*. CRC Press. Boca Ratón, pp. 20-59.
- Eyzaguirre J. (2000). *Lignocellulose biodegradation. Enzyme structure and function*. Redes internacionales. Internet: [www. Bio.puc.cl/profs/jeyzag/jeyzag1.htm](http://www.Bio.puc.cl/profs/jeyzag/jeyzag1.htm).
- Gaitán-Hernández R., Salmenes D., Pérez-Merlo R. y Mata A. (2002) *Manual práctico del cultivo de setas: aislamiento, siembra y producción*. Instituto de Ecología, Xalapa, Ver. México.
- González-del-Carpio Ch. (2000). Planta de composta de de-

- sechos de poda. Residuos México. *I*, 20-22. Wastex 2000 Inc. México, D.F.
- Guzmán-Dávalos L., Soto-Velazco C. y Martínez-Carrera D. (1987a). El bagazo de caña de azúcar como sustrato para la producción de *Pleurotus ostreatus* en Jalisco. *Rev. Mex. Micol.* *3*, 79-82.
- Guzmán-Dávalos L., Martínez-Carrera D., Morales P. y Soto-Velazco C. (1987b). El cultivo de hongos comestibles [*Pleurotus*] sobre el bagazo de maguey de la industria tequilera. *Rev. Mex. Micol.* *3*, 47-49.
- Guzmán G., Mata G., Salmones D., Soto-Velazco C. y Guzmán-Dávalos L. (1993). El cultivo de los hongos comestibles: con especial atención a especies tropicales y subtropicales en esquilmos y residuos agro-industriales. Instituto Politécnico Nacional, México D.F.
- Hadar Y., Kerem Z., Gorodecki B. y Ardon O. (1992). Utilization of lignocellulosic waste by the edible mushroom, *Pleurotus*. *Biodegradation* *3*, 189-205.
- Higuchi T. (1990). Lignin biochemistry: biosynthesis and biodegradation. *Wood Sci. Technol.* *24*, 23-63.
- Manahan S. E. (2000). *Environmental chemistry*. CRC Press. Boca Ratón, 7a. ed.
- Nava L.E. y Espinosa V.R.M. (1992). Tratamiento de pañales desechables empleando un cultivo de hongos comestibles. Memorias del VIII Congreso Soc. Mex. de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cap. V. Desechos sólidos, s/pp. Cocoyoc, Morelos, México.
- SEDUE (1985). Subsecretaría de Ecología. NOM AA67-1985. Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales-Determinación de la relación carbono/nitrógeno. Dirección General de Normas. D.F., México,
- Tejada I. (1983). *Manual de laboratorio para análisis de ingredientes utilizados en la alimentación animal*. Patronato de Apoyo a la Investigación y Experimentación Pecuaria en México, A.C., México D.F, 385 p.
- Wang D., Sakoda A. y Suzuki M. (2001). Biological efficiency and nutritional value of *Pleurotus ostreatus* cultivated on spent beer grain. *Bioresource Tech.* *17*, 293-300.