

Biodegradación de residuos lignocelulósicos secundarios por *Pleurotus* spp

Biodegradation of lignocellulosic agroindustrial wastes by *Pleurotus* spp

Rosa Catalina Bermúdez-Savón¹ <https://orcid.org/0000-0002-8901-8826>

Nora García-Oduardo¹ <https://orcid.org/0000-0001-9120-038X>

Isabel Arelis Aguilera-Rodríguez¹ <https://orcid.org/0000-0003-0940-213X>

Yuneisi Mendoza-Montero² <https://orcid.org/0000-0002-4994-1528>

¹Centro de Estudios de Biotecnología Industrial (CEBI). Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba

²Oficina Nacional de Inspección Estatal, Ministerio Industria Alimenticia, Santiago de Cuba, Cuba

*Autor para la correspondencia: correo electrónico: norag@uo.edu.cu

RESUMEN

Uno de los procesos más viables económicamente para la bioconversión de residuos lignocelulósicos es la producción de setas comestibles por fermentación en estado sólido (FES), alcanzándose como resultado del proceso, productos de alto valor agregado. Es importante evaluar el grado de biodegradación que presentan los diferentes sustratos por *Pleurotus*, pues es un proceso de dependencia multifactorial. El objetivo de este trabajo es realizar la valoración de la biodegradación de los residuales: pulpa de café, cáscara de cacao y otros. Se utilizaron los criterios de bioconversión, eficiencia biológica, la relación Carbono/Nitrógeno (C/N) y los cambios en la composición inicial y final de los residuos. Se muestran variaciones en: C/N, fibra bruta, lignina, polifenoles, cafeína, materia orgánica, y en los niveles de bioconversión en ambos residuos. Los más notorios fueron las disminuciones en el contenido de cafeína, fibra bruta, C/N, lignina y polifenoles. En la

valoración realizada de diferentes residuales, se evidencia la importancia que tiene la especie *Pleurotus* empleada, la composición química y las características físicas de los residuales para el desarrollo y crecimiento del *Pleurotus* y por tanto, para su biodegradación. Algunos factores muestran una relación directa o indirecta con la biodegradación, pero no se pueden considerar condicionantes absolutas pues están sujetas a la influencia de otros muchos factores. El cultivo de setas *Pleurotus* spp puede ser considerado como un proceso biotecnológico prominente para la reducción y valorización de residuos, los cuales pueden usarse para producir productos de valor añadido y por tanto aportar a la economía circular.

Palabras clave: *Pleurotus* spp.; fermentación en estado sólido; residuales lignocelulósicos; eficiencia biológica; bioconversión.

ABSTRACT

One of the most economically viable processes for the bioconversion of lignocellulosic agroindustrial wastes is the production of edible mushrooms by solid state fermentation (SSF), achieving high value-added products as a result of the process. It is important to evaluate the degree of biodegradation presented by the different substrates by *Pleurotus*, since it is a process of multifactorial dependence. The objective of this work was to evaluate the biodegradation of lignocellulosic agroindustrial wastes: coffee pulp, cocoa shell and others. The criteria of bioconversion, biological efficiency, the Carbon/Nitrogen (C/N) ratio and the changes in the initial and final composition of the residues were used. Variations are shown in: C/N, crude fiber, lignin, polyphenols, caffeine, organic matter, and in the bioconversion levels in both residues. The most notable were the decreases in the content of caffeine, crude fiber, C/N, lignin and polyphenols. In the evaluation made of different lignocellulosic wastes are evident many aspects: the *Pleurotus* species used is very important, the chemical composition and the physical characteristics of the wastes for the development and growth of *Pleurotus* and therefore for its biodegradation. Some factors show a direct or indirect relationship with biodegradation, but they cannot be considered absolute conditioning factors since they are subject to the influence of many other factors. The cultivation of *Pleurotus* spp mushrooms can be considered as a prominent biotechnological process for the reduction and recovery of wastes, which can be used to produce value-added products and therefore contribute to the circular economy.

Keywords: *Pleurotus*, solid state fermentation; lignocellulosic agroindustrial wastes; biological efficiency; bioconversion.

Recibido: 15/05/2022

Aceptado: 28/08/2022

Introducción

Uno de los grandes retos de la comunidad internacional en el siglo XXI, es convertir los procesos productivos en sostenibles, desempeñando la biotecnología un papel importante en esta transformación tecnológica, al dirigir sus investigaciones en el campo del aprovechamiento de los residuos, hacia la utilización de nuevas herramientas que prevengan, controlen y remedien la contaminación ambiental.^(1,2)

Grandes cantidades de materiales lignocelulósicos son generados en industrias de diversos tipos tales como las del papel, la forestal, cafetalera, azucarera, entre otras.⁽¹⁾ Los residuos lignocelulósicos de dichas industrias podrían transformarse en productos utilizables tales como proteína fúngica y forraje para el ganado, combustibles líquidos, ácidos orgánicos, glucosa y alcoholes,^(3,4) sin embargo, la mayoría se convierten en fuente de problemas ambientales, pues son vertidos indiscriminadamente al medio sin tratamiento alguno, ocupando mucho espacio; su degradación natural es lenta y casi imposible en los volúmenes que se genera.⁽¹⁾

De acuerdo con ⁽⁵⁾ estos residuos aún no han sido aprovechados eficientemente por la falta de conocimiento sobre los métodos apropiados para la preparación y caracterización de sustancias de mayor valor agregado con la suficiente calidad e inocuidad.

Los hongos se encuentran entre los microorganismos responsables del reciclaje del carbono proveniente de la lignina, tanto por su capacidad hidrolítica como por su distribución, o potencialidad como degradadores de lignina, valorándose como organismos lignocelulolíticos por excelencia.^(5,6)

Entre ellos existen algunos con mayor capacidad degradativa de lignina, como los que producen la llamada “pudrición blanca” que presentan un sistema enzimático con un uso

potencial en la transformación de compuestos contaminantes y xenobióticos,⁽⁷⁾ desempeñando un importante papel en el proceso de bioconversión,⁽⁸⁾ ya que son capaces de reducir grandes cantidades de residuos, minimizar la contaminación y formar productos de interés para la industria de los alimentos, papel, fármacos, la agricultura, entre otras.

El cultivo de setas comestibles es una industria Biotecnológica en continuo proceso de expansión y que va cobrando mayor importancia en el ámbito económico de muchos países. Entre los principales países productores de setas comestibles se encuentran China, Estados Unidos, Países Bajos, Francia, España, Polonia, Italia, Canadá, Irlanda y Reino Unido.⁽⁷⁾

La definición de pudrición blanca se basa por el tipo de pudrición que causan en la madera, contiene cientos de especies de Basidiomicetos, capaces todas de degradar la lignina, celulosa y hemicelulosa de la madera, pero la velocidad y extensión de la degradación de cada componente de la pared celular varía considerablemente en función de la especie, condiciones de fermentación y tipo de material lignocelulósico.⁽⁹⁾

En la actualidad distintos grupos de trabajo en el mundo, se dedican al estudio del aprovechamiento de residuos agroindustriales asociados a alimentos y relacionados con la transformación de los productos lignocelulósicos, los que proveen soporte y algunos nutrientes para el desarrollo de estos hongos que convierten la celulosa y lignina en abonos para la agricultura, alimento humano y alimento para rumiantes.^(4,10)

Con estos fines se ha cultivado e investigado el hongo *Pleurotus* spp., el cual es uno de los hongos de pudrición blanca más estudiado ⁽¹¹⁾ y se cultiva como seta comestible. En nivel mundial está entre los cuatro más expandidos; por sus facilidades para crecer sobre una gran diversidad de residuos agroindustriales, por lo simple de su tecnología de cultivo y la calidad nutritiva y organoléptica de su cuerpo fructífero.⁽⁶⁾

El Centro de Estudios de Biotecnología Industrial (CEBI), de la Universidad de Oriente, ha estudiado y profundizado en varios aspectos sobre la valorización de diferentes residuos agroindustriales secundarios en el cultivo de setas comestibles-medicinales *Pleurotus* spp. para la obtención de productos de valor añadido, así como aplicaciones del sustrato remanente, producto de la biodegradación como consecuencia del proceso fermentativo que ocurre para la producción de las setas comestibles.^(12,13)

El presente trabajo está dirigido a la evaluación de la biodegradación que produce el hongo *Pleurotus* spp sobre residuales lignocelulósicos secundarios ya que, mientras más conocimiento se tenga acerca del proceso de biodegradación, mayores aplicaciones se pueden alcanzar en la obtención de productos de alto valor agregado, para el desarrollo de procesos sostenibles, aportando de manera prominente, aplicaciones en la economía circular.^(14,15)

Materiales y métodos

Biodegradación por *Pleurotus*

Las fermentaciones en estado sólido han sido utilizadas ampliamente en el reciclaje de materiales voluminosos a través de tecnologías sencillas, con la que se logran incrementar los valores proteicos, mejorando el balance de aminoácidos y la digestibilidad de las materias primas empleadas ^(5,10) brindando la posibilidad de producir, por vía biotecnológica y de forma combinada, setas comestibles *Pleurotus* spp. y forraje beneficiado; siendo la única tecnología que permite obtener mediante la bioconversión de residuales lignocelulósicos agroindustriales, alimento humano y alimento animal.⁽¹⁶⁾

La lignocelulosa es el componente principal de la biomasa vegetal y es el más abundante de los recursos renovables. Se compone de tres tipos de polímeros: celulosa (principal componente), hemicelulosa y lignina, que están fuertemente entrelazados y unidos químicamente por fuerzas no covalentes y reticulaciones covalentes, ⁽¹⁷⁾ formando un sello físico en la pared celular de las plantas que es una barrera impenetrable. La composición y las proporciones de estos tres compuestos varían entre cada planta.⁽¹⁸⁾ La celulosa y la hemicelulosa son macromoléculas construidas a partir de diferentes azúcares.

Muchos microorganismos son capaces de degradar la celulosa y la hemicelulosa para utilizarlos como fuente de carbono y energía. Sin embargo, los hongos conocidos como los de pudrición blanca, entre los cuales se encuentran los del género *Pleurotus*, son los que poseen la capacidad única de degradar de manera eficiente la lignina a CO₂ y agua, ⁽¹⁸⁾ descomponiendo este componente que es el más recalcitrante de la pared celular de varios residuales secundarios (tabla 1).

Tabla 1- Composición química (%) de algunos residuales secundarios empleados en la producción de setas comestibles y/o enzimas ligninolíticas, por FES. (8,13)

Residuales secundarios	Lignina	Celulosa	Hemicelulosa
Bagazo de caña	11-14	33-38	22-34
Pulpa de café	12,2-17,5	17,7-18,0	0,98-2,00
Cáscara de cacao	10,8	12,4	ND
Cáscara de coco (fibra)	34	42,5	3-12
Aserrín	22-27	44-56	11-30
Paja de trigo	14-15	30-43	36-50

Durante el crecimiento y el desarrollo del micelio, los cambios bioquímicos tienen lugar como consecuencia de la producción de enzimas extracelulares. Estas enzimas degradan los componentes insolubles y gran cantidad de material lignocelulósico en compuestos solubles y de bajo peso molecular, que son tomados posteriormente por las enzimas intracelulares del hongo para su nutrición. Por lo tanto, las enzimas tienen un papel significativo en el crecimiento y desarrollo de hongos.⁽¹⁹⁾

Los hongos *Pleurotus* tienen dos tipos de sistemas enzimáticos extracelulares: el sistema de hidrólisis, que produce hidrolasas que son responsables de la degradación de polisacáridos, y un sistema ligninolítico oxidativo único, que degrada lignina y abre los anillos de fenilo.⁽¹⁸⁾ El sistema enzimático ligninolítico es poco específico, ya que las peroxidasas y oxidasas actúan al azar sobre la molécula de lignina, generando radicales libres que son inestables y tienden a polimerizarse.

Las principales enzimas que actúan directa o indirectamente sobre la lignina son: lignina peroxidasas (LiP), manganeso peroxidasas (MnP) y lacasas.⁽²⁰⁾ Los hongos de pudrición blanca, secretan una o más de las tres enzimas extracelulares oxidativas esenciales en la mineralización de lignina: la LiP que, por síntesis endógena de H₂O₂, oxida el veratril alcohol y compuestos aromáticos no fenólicos, en una reacción que genera radicales arilo y alquilo que se anabolizan intracelularmente; la MnP, que oxida componentes fenólicos de la lignina, mediante la reacción de oxidación del Mn²⁺ a Mn³⁺, la cual es dependiente del H₂O₂; y la lacasa, una fenol oxidasa con cobre, que oxida anillos de la lignina.⁽¹⁷⁾

Todas estas enzimas participan en la degradación bajo condiciones de fermentación en estado sólido, y se ha detectado que ayudan tanto a la infestación del micelio sobre el sustrato como a la degradación del mismo.⁽²¹⁾ Dentro de los residuales secundarios lignocelulósicos de origen agroindustrial susceptibles de ser utilizados como sustratos en la FES, empleando *Pleurotus* spp, se destacan: pulpa de café, la paja de caña, la paja de arroz, hojas de plátano, aserrín, paja de maíz, la cáscara de cacao, cáscara de coco y cáscara de maní y otras.⁽⁸⁾

En la mayoría de los estudios al utilizar el *Pleurotus*, seta comestible-medicinal, el interés es obtener una alta producción de setas comestibles y hacia ello es que se dirigen las condiciones de los experimentos, pero también hay investigadores que utilizan los sustratos biodegradados con diferentes fines: biodegradación de compuestos recalcitrantes y xenobióticos,⁽²²⁾ rompimiento de enlaces diversos, y por tanto, compuestos orgánicos, obtención de alimento animal, biorremediación de suelos, obtención de fertilizantes y otros, por ello es importante conocer el grado de biodegradación ocurrida.

Pleurotus tiene la capacidad de degradar la lignina en las paredes celulares y descomponer y mineralizar componentes celulares de las plantas, debido a que, durante la colonización del sustrato por el hongo, éste tiene la potencialidad de llevar los carbohidratos a azúcares más simples, por el proceso de metabolismo fúngico o primario. Los azúcares son consumidos totalmente por el hongo y entonces llegan al metabolismo secundario, el cual consiste en la ruptura de los carbohidratos estructurales y la lignina por las enzimas extracelulares: lacasas, manganeso peroxidasa y lignina peroxidasa. Empleando el *Pleurotus* puede evaluarse el efecto sobre la composición química de los diferentes residuos.⁽⁶⁾

Criterios en la evaluación de la biodegradación

Los cuerpos fructíferos fueron obtenidos por FES, empleando como biorreactores bolsas de polietileno, utilizando como sustrato los residuos secundarios lignocelulósicos: pulpa de café, cáscara de cacao y cáscara de coco. Las respuestas a obtener fueron: eficiencia biológica, producción de residuo remanente *post* cosecha, bioconversión, cambios en la composición del sustrato inicial y *post* cosecha, así como la relación C/N.

Eficiencia biológica

Se considera que la eficiencia biológica es directamente proporcional a la biodegradación del residuo, en la tabla 2, se presentan resultados para los residuos secundarios: pulpa de café, cascara de cacao, cascara de coco y cascara de maní.

Tabla 2- Valores de eficiencia biológica de la cepa CCEBI 3024 de *Pleurotus* cultivada sobre diferentes residuos secundarios puros y mezclados

Residuo secundario	EB%	Referencia
Pulpa de café <i>Coffea arábica</i> L	168,0	23
Pulpa de café <i>Coffea canephora</i> variedad robusta	70,9	23
Pulpa de café <i>Coffea canephora</i> variedad robusta	59,4*	26
Cáscara de cacao <i>Theobroma cacao</i> L	84,5	23
Cáscara de coco <i>Cocos nucífera</i> Lin	90,0	23
Viruta de cedro <i>Teona ciliata</i> Roem	67,3	25
Cáscara de maní <i>Arachis hypogaea</i> L	56,2	24
Pulpa de café <i>Coffea arábica</i> L: Viruta de cedro <i>Teona ciliata</i> Roem (1:1)	136,9**	13
Pulpa de café <i>Coffea arábica</i> L: Viruta de cedro <i>Teona ciliata</i> Roem (1:1)	75,0***	13
Pulpa de café <i>Coffea arábica</i> L: Cáscara de coco <i>Cocos nucífera</i> Lin(1:1)	113,9	25
Pulpa de café <i>Coffea arábica</i> L: Cáscara de coco <i>Cocos nucífera</i> Lin(3:1)	110,6	25

*Con la cepa CCEBI 3023 **Con la cepa CCEBI 3021 *** Con la cepa CCEBI 3027

Los residuos tuvieron diferencias en su composición química, particularmente en la relación C/N y las cenizas. La pulpa de café mostró la menor relación C/N, 16 y el mayor contenido de cenizas, 12,82 %, mientras que, lo opuesto fue la viruta de cedro, con mayor relación C/N, 524 y menor contenido de cenizas, 1,23 %.

La pulpa de café fue el sustrato con el que se obtuvieron las mejores eficiencias biológicas de setas comestibles, incluso cuando se utilizó en mezclas (tabla 2). Estas mezclas optimizan la relación C/N, mejorando la estructura, la porosidad de los sustratos.⁽²⁶⁾

Resultados del cultivo con mezclas de diferentes residuos (aserrín + residuos de café + residuos de coco)⁽²⁷⁾ muestran que no influyen en las características morfológicas del *Pleurotus ostreatus* y además, los que se cultivan solo con el aserrín se contaminan menos. Resultado similar obtuvo⁽²⁵⁾ con mezclas de pulpa de café y virutas de cedro.

Bioconversión

La pérdida de la materia orgánica es el criterio más simple adoptado para evaluar la extensión de la biodegradación del sustrato, ya que concomitante con el crecimiento y fructificación de las setas sobre residuales lignocelulósicos, se presenta un decremento en el contenido de materia orgánica.⁽²⁵⁾ Esto es debido a las pérdidas de CO₂ y H₂O durante el metabolismo de los hongos y también a la remoción de materiales del sustrato por la formación de cuerpos fructíferos (tabla 3).

Tabla 3- Bioconversión (%) de residuales y su comparación con otros autores ⁽²⁵⁾

Residual secundario	Setas	Sustrato remanente	CO ₂ y H ₂ O
Pulpa de café	31,3	35,2	33,5
Cáscara de cacao	20,6	27,9	51,5
Cáscara de coco ⁽²⁵⁾	12,4	70,3	17,3
Pulpa de café ⁽²⁵⁾	17,0	27,0	56,0

Los mayores niveles de bioconversión en setas se obtienen con pulpa de café, 31,3 % y con cáscara de cacao, 20,6 %, superiores a los valores publicados por otros autores (tabla 3), reflejan la eficiencia del proceso fermentativo, aunque se debe señalar que el resultado reportado por ⁽²⁵⁾ se obtuvo en condiciones rurales y se realizó el cálculo teniendo en cuenta la cosecha, solamente hasta la segunda oleada de setas.

Composición al inicio y *post* cosecha de los residuos

La medida de la biodegradación deseada, puede valorarse con el empleo de diferentes parámetros, los más empleados son los que utilizan la determinación de la composición inicial y *post* cosecha de los sustratos, que permiten explicar y profundizar en las biotransformaciones ocurridas. Se realizaron las siguientes determinaciones: pH, materia orgánica, cafeína, polifenoles, cenizas, humedad, minerales, nitrógeno, fósforo, potasio, fibra bruta, carbohidratos y lignina.^(28, 29)

Los métodos empleados son reportados en ⁽¹³⁾ y los residuales fueron la pulpa de café y la cascara de cacao. Los análisis se realizaron en los laboratorios del CEBI, de la Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar y en el Laboratorio Regional de Suelos.

Al realizar una comparación de la composición porcentual de los sustratos al inicio y *post* cosecha (tabla 4) se aprecia que existen variaciones en los parámetros evaluados luego de ser biodegradados por el hongo, encontrándose diferencias estadísticamente significativas en todos.

Tabla 4- Comparación entre la composición al inicio y *post* cosecha de los sustratos.

Determinaciones (% base seca)	Pulpa de café		Cáscara de cacao	
	Inicio	Post cosecha	Inicio	Post cosecha
Humedad	10,31±0,09 ^a	12,68 ±0,09 ^b	10,20±0,05 ^a	18,81±0,04 ^c
Materia seca	89,69±0,2 ^a	87,32 ±0,3 ^b	89,80±0,3 ^a	81,19±0,11 ^c
Materia orgánica	82,52±0,1 ^a	78,15 ±0,05 ^b	80,50±0,03 ^a	75,03±0,08 ^c
Grasa cruda	5,98 ±0,07 ^a	4,53 ± 0,03 ^b	9,78±0,28 ^c	7,99±0,04 ^d
Fibra bruta	17,66± 0,12 ^a	13,82 ±0,1 ^b	23,00±0,1 ^c	19,22±0,23 ^d
Carbohidratos	58,24±0,3 ^a	49,54 ±1,2 ^b	56,28±0,28 ^a	52,75±0,25 ^b
C/N	17,00± 0,43 ^a	13,67 ±0,15 ^b	53,10±0,1 ^c	19,57±0,55 ^d
Cenizas	7,17± 0,07 ^a	9,20 ±0,04 ^b	9,30±0,02 ^b	6,18±0,19 ^a
Lignina	12,79 ± 0,04 ^a	9,79 ±0,03 ^b	10,8± 0,05 ^c	6,87±0,46 ^d
Cafeína	1,75 ±0,05 ^a	0,04 ±0,02 ^b	1,09±0,02 ^c	0,01±0,002 ^d
Fenoles	0,3 ±0,02 ^a	0,09 ±0,01 ^b	0,06±0,002 ^c	0,0070±0,002 ^d

Letras iguales indican que no existen diferencias estadísticamente significativas.

Los valores de fibra bruta en pulpa de café disminuyen de 17,66 % hasta 13,82 % existiendo una diferencia estadísticamente significativa entre ambos sustratos, situación similar ocurre con la cáscara de cacao que los valores descienden 23 % a 19,22 % (tabla 4), evidenciando la actividad biodegradadora del hongo. Se considera que la fibra bruta es la materia recalcitrante más difícil de ser degradada y constituye una barrera de acceso del hongo al sustrato.⁽³⁰⁾

Las enzimas hidrofóbicas que son producidas por el micelio del hongo, catalizan la degradación de las moléculas en unidades más pequeñas, las cuales son utilizadas por el hongo como nutrientes,⁽³¹⁾ por lo que se reportan muchos trabajos donde se evalúa la degradación en función de la disminución de la fibra bruta.

Al evaluar la variación de la concentración de lignina que ocurre en la pulpa de café inicial y *post* cosecha, se observan diferencias estadísticamente significativas, al encontrarse los niveles de concentración en la pulpa en 12,79 % y luego del proceso de fermentación alcanzan un valor de 9,79 %, complementándose con los resultados anteriormente evaluados los criterios sobre la capacidad del *Pleurotus* de degradar estos polímeros tan complejos; situación similar se reporta para la cáscara de cacao, inicial 10,80 % y el sustrato *post* cosecha 6,7 %.

Muchos autores dan seguimiento a la biodegradación de los sustratos lignocelulósicos por la variación en la concentración de los carbohidratos, durante el proceso de fermentación, el hongo consume primeramente los compuestos más simples ⁽³²⁾ como las pectinas, hemicelulosa y los sacáridos simples en la fase de crecimiento micelial, mientras que, la lignina es degradada en la fase de fructificación.⁽⁸⁾ Si comparamos los resultados de la concentración de carbohidratos (tabla 4), se observa una disminución de los contenidos de los mismos, en los dos residuos estudiados.

Por otra parte, dada la importancia que tiene el carbono para la célula, este elemento es el que más se utiliza durante el crecimiento y desarrollo de *Pleurotus* spp., y puede ser asimilado a partir de diferentes fuentes como polímeros, carbohidratos y lípidos, encontrándose dentro de los parámetros más empleados, la relación C/N.

La relación C/N para la pulpa de café es de 17,00 % y la cáscara de cacao de 53,10 %, mientras que, los sustratos *post* cosecha presentan valores de 13,67 y 19,57 %, respectivamente (tabla 4), este resultado se explica por el incremento relativo de la concentración de nitrógeno total, como consecuencia de la disminución del contenido de carbono en forma de desprendimiento de dióxido de carbono.

Esto último está asociado a la actividad microbiológica desarrollada en el interior del sustrato, y principalmente por el uso de fuentes de carbono presentes en el mismo para el desarrollo y producción del hongo, ⁽³³⁾ encuentran relación entre la disminución de C/N y el aumento en la eficiencia biológica en cepas de *P. ostreatus* (CCMC H-041 e IE-8) y *P. pulmonarius* (IE-115) en mezclas con altos contenidos de madera de vid.

Estos autores también reportan una disminución en la relación C/N en los residuales *post* cosecha después de incubar por 25 días *P. sajor-caju* en paja de cebada (25,6 %), bagazo de caña de azúcar (61,9 %) y hojas de plátano (57,1 %), en estas variaciones pueden influir a la cepa empleada y el tipo de sustrato.

Simultáneamente al crecimiento y fructificación de las setas sobre residuales lignocelulósicos se presenta un decremento en el contenido de materia orgánica, evidenciado en la pulpa de café, de 82,52 hasta 78,15 % y en la cáscara de cacao, que disminuyó de 80,50 a 75,03 % (tabla 4).

La disminución de la concentración de los fenoles totales y la cafeína de la pulpa de café (0,04 para la cafeína y 0,09 para los fenoles) está asociada con la producción de la enzima lacasa, la cual puede ser responsable de esta transformación, ⁽²²⁾ junto a otras enzimas, que se expresan en menor actividad; se conoce que la pulpa de café está compuesta, entre otros, por lignina y compuestos aromáticos con estructura química semejante a esta, los cuales son inductores de enzimas lacasas. Resultados similares se obtuvieron para la cáscara de cacao *post* cosecha con una disminución en su concentración.

Investigaciones realizadas con el empleo de columnas de Rimbault conteniendo pulpa de café, ⁽¹³⁾ por FES con dos cepas de *Pleurotus*, muestran que existe una disminución del contenido de fenoles totales del sustrato por las dos cepas estudiadas, siendo evidente desde las primeras 24 h la disminución de la concentración de estos compuestos tóxicos y luego durante el resto de los días de fermentación a un nivel casi constante de la concentración. La cepa CCEBI 3023 presentó mayores niveles de biotransformación (53,07 % de fenoles totales transformados a las 24 h) que la cepa CCEBI 3024 (45,51 %, a las 48 h). La disminución máxima de concentración de cafeína se observó al séptimo (último) día estudiado, los valores de remoción de cafeína, independientemente de la escala de fermentación, oscilaron entre 15-24 %.⁽¹³⁾

En cuanto a la composición de macro y micro elementos (datos no presentados), ocurre una disminución en la concentración de sodio, hierro, fosforo y potasio, reportándose diferencias estadísticamente significativas para estos elementos evaluados en sustrato *post* cosecha con respecto al sustrato inicial.

Conclusiones

- Se evidencia la importancia que tiene la composición química y las características físicas de los residuales, para el desarrollo y crecimiento de *Pleurotus* spp. y por tanto para la biodegradación de los mismos.

- *Pleurotus* el más importante protagonista en la biodegradación de los residuales lignocelulósicos, por producir enzimas hidrolíticas, responsables de la degradación de los polisacáridos y enzimas oxidativas (ligninasas), responsables de la modificación y la degradación de la lignina.
- El cultivo de setas puede ser considerado como un proceso biotecnológico prominente para la reducción y valorización de residuos. Estos residuos son generados como resultado de la conversión amigable de subproductos de bajo valor en nuevos recursos, los cuales pueden usarse para producir productos de valor añadido y por tanto, aportar a la economía circular.

Referencias bibliográficas

1. VARGAS, YA, PÉREZ, LI. Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 2018, **14**(1):1-14. ISSN 1900-4699.
2. GRANDE, C. Valoración biotecnológica de residuos agrícolas y agroindustriales. Cali: Editorial Bonaventuriana, 2016. ISBN 978-958-8785-81-3.
3. PHILIPPOUSSIS, A *et al.* Agro-food industry wastes and agricultural residues conversion high value products by mushroom cultivation". Proceeding of 7th International Conference on Mushroom Biology and Mushroom Products (Arcachon, France, 4-7 October, 2011). Vol. I. 344-356.
4. GRIMM, D; Wösten, HAB. Mushroom cultivation in the circular economy. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2018, 102, 7795–7803, doi: 10.1007/s00253-018-9226-8.
5. VELLAICHAMY, Y *et al.* Fermentation Technology: A Viable Tool for Bio-conversion of Lignocellulosic Biomass into Value-Added Products. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2020, **9**, 7. ISSN: 2319-7706.
6. MUSWATI, C *et al.* The effects of different substrate combinations on growth and yield of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*). *International Journal of Agronomy*. 2021, **20**, 1-10, Article ID 9962285.
- 7, PIÑA, AB, NIETO, DA *et al.* Utilización de residuos agrícolas y agroindustriales en el cultivo y producción del hongo comestible seta (*Pleurotus* spp.). *Rev. Int. Contam.*

- Ambient.* 2016, **32** (Especial Residuos Sólidos), 141-151. DOI: 10.20937/RICA.2016.32.05.10. ISSN 0188-4999
8. KUMLA, J, *et al.* Cultivation of mushrooms and their lignocellulolytic enzyme production through the utilization of agro-industrial waste. *Molecules*, 2020, **25**, 2811, doi: 10.3390/molecules25122811. ISSN: 1420-3049.
 - 9 .SINGH, V. Biodegradation of lignocellulosic wastes by cultivation of mushrooms as nutrient source. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2019, **9**, 5, 802-808. ISSN: 2319-7064. DOI: 10.21275/SR20512180147.
 10. FONTALVO, L, *et al.* Efecto de residuos agroforestales parcialmente degradados por *Pleurotus ostreatus* sobre el desarrollo de plántulas de tomate. *Acta Biológica Colombiana*, 2013, **18**, 2, 365-374. e-ISSN: 1900-1649.
 11. GRIMM, W, *et al.* Integration of mushroom production into circular food chains. Springer Nature. Org. Agr. B.V. Thünen-Institut of Agricultural Technology, 2020, Braunschweig, Germany.
 12. MORRIS, HJ, *et al.* Capítulo VI. Otros usos de los macromicetos en hongos comestibles y medicinales en Iberoamérica: investigación y desarrollo en un entorno multicultural. Editores Sánchez JE y Mata G, INECOL-ECOSUR, México, 2012, ISBN-978-607-7637-73-8
 13. GARCÍA, N. Producción de setas comestibles y enzimas lacasas por fermentación en estado sólido de la pulpa de café con *Pleurotus spp.* Tesis de Doctor en Ciencias Técnicas. Centro de Estudios de Biotecnología Industrial. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba. 2008. 150pp
 14. PHAN, CW, SABARATNAM, V. Potential uses of spent mushroom substrate and its associated lignocellulosic enzymes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2012, **96**, 863-873.
 15. GORDANA, Š, *et al.* A Comprehensive review on valorization of agro-Food industrial residues by solid-state fermentation. *Food* 2021, **10**, 927. <https://doi.org/10.3390/foods10050927>
 16. CHANG, ST. Mushroom cultivation using the “Zeri” principle: potential for application in Brazil. *Micología Aplicada Internacional*, 2007, **19**, 2, 33–34. ISSN 1534-2581. Berkeley, CA, U.S.A.

17. PÉREZ, J, *et al.* Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *Int. Microbiol.* 2002, 5, 53-63. DOI:10.1007/s10123-002-0062-3
18. SÁNCHEZ, C. Lignocellulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi. *Biotechnol. Adv.* **27**, 185-194. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bio-techadv.2008.11.001>
19. KURT, S. y BUYUKALACA, S. Yield performances and changes in enzyme activities of *Pleurotus* spp. cultivated on different agricultural wastes. *Bioresource Technol.* 2010, **101**, 3164-3169. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.011>
20. YOUNG, R. y AKHTAR, M. (editores) Environmentally friendly technologies for the pulp and paper industry. John Wiley y Sons, Inc. New York, EUA. 1998, 577 pp. ISBN: 978-0-471-15770-0.
21. KUDRYAVTSEVA, O, *et al.* Fungal proteolytic enzymes: Features of the extracellular proteases of xylophilic basidiomycetes. *J. Microbiol.* 2008, **77**, 643-653. DOI: 10.1134/S0026261708060015.
22. RODRÍGUEZ, S. Decoloración de los residuales de la Pasteurización de la pulpa de café y la vinaza por *Pleurotus* sp. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Biológicas. 2006. Centro de Estudios de Biotecnología Industrial. Universidad de Oriente.
23. BERMÚDEZ, RC, *et al.* Cultivation of *Pleurotus* on agricultural substrates in Cuba. *Micología Aplicada Internacional.* 2001, **13**, 25-29. ISSN 1534-2581. Berkeley, CA, U.S.A.
24. ÁLVAREZ, LM, *et al.* Influencia de tres residuos lignocelulósicos en la producción de *Pleurotus ostreatus* cepa CCEBI 3024. *Ciencia e Innovación Tecnológica*, vol. II. Capítulo Ciencias Aplicadas. Coedición Editorial Académica Universitaria y Revista Opuntia Brava. 2018. ISBN 978-959-722.
25. BERMÚDEZ, RC y GARCIA N. Capítulo 27. Cultivo de setas comestibles (*Pleurotus*) en el Centro de Estudios de Biotecnología Industrial, Cuba. En: Daniel MARTINEZ, Hacia un desarrollo sostenible del sistema de producción-consumo de los hongos comestibles y medicinales en Latinoamérica: Avances y Perspectivas en el Siglo XXI. Puebla, México: 2010, pp. 489-512. ISBN 970-9752-01-4.
26. BERMÚDEZ, RC, *et al.* Evaluación de la productividad de dos cepas de *Pleurotus* spp sobre pulpa de café *Coffea canephora*. *Revista Tecnología Química.* 2018, **38**(2) 290-298. ISSN: 2224-6185.

27. ELSISURA, I. Growth and yield performance of oyster mushroom cultivated in combined cassava peels, coconut residue and coffee waste substrates. *American Journal of Environment and Climate*. 2022, **1**(1), 1-11. ISSN: 2832-403X (*Online*) DOI: <https://doi.org/10.54536/ajec.v1i1.206> <https://journals.e-palli.com/home/index.php/ajec>
28. BERMÚDEZ, RC, *et al.* Evaluación del sustrato remanente de setas *Pleurotus sp.* en la producción de posturas de *Carica papaya* Lin. *Revista Tecnología Química*. 2021, **41**(2), 428-442. ISSN: 2224-6185.
29. RODRÍGUEZ, N y JARAMILLO, V. Cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus* sobre residuos agrícolas de la zona cafetera. Boletín Técnico No.27, Centro Nacional de Investigaciones del Café. CENICAFE, Chinchiná-Caldas-Colombia. 2005. ISBN 0128-047X.
30. OMARINI, A. Producción intensiva sobre desechos lignocelulósicos, análisis nutricional y cualidades organolépticas de *Polyporus tenuiculus* (*Polyporaceae*, Basidiomycetes). Biodeterioro y biotransformación del sustrato. Tesis Doctoral en Biología Molecular y Biotecnología. Instituto tecnológico de Chascomus. 2012. Universidad Nacional General San Martín. Argentina. 182 pp.
31. RAHARDJO, Y, *et al.* Modeling conversion and transport phenomena in solid-state fermentation: A review and perspectives. *Biotechnology Advances*. 2006, **24**, 161-179. ISSN 0734-9750.
32. RAVERA, C, *et al.* Aprovechamiento de los residuos agrícolas. Procesamiento de la caja del maní, su conversión biológica y productos. I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. REDISA. Castellón 23-24 de julio 2013. **37**, Luna Azul. ISSN 1909-2474.
33. SÁNCHEZ, J y ROYSE, D. La biología y el cultivo de *Pleurotus spp.* Editorial ECOSUR/ LIMUSA, México. 2002. ISBN 968-18-6357-7.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses.

Contribución de cada autor

Rosa Catalina Bermúdez Savón: confección del informe y diseño de la metodología experimental de la investigación.

Nora García Oduardo: revisión del informe, diseño de la metodología experimental de la investigación y análisis estadístico.

Isabel Arelis Aguilera Rodríguez: parte experimental de la investigación.

Yuneisi Mendoza Montero: parte experimental de la investigación.