



SEMINÁRIO INTERNACIONAL BRASIL - COLÔMBIA SOBRE PROCESSOS INDUSTRIAIS SUSTENTÁVEIS



Evaluación del potencial de la cáscara de cacao (*Theobroma cacao L*) en fermentación en estado sólido para el crecimiento del hongo comestible (*Lentinula edodes*)

Daniel Esteban Giraldo Briceño^{1*}; Henry Reyes Pineda¹; Julio Cesar Luna Ramirez¹.

*degiraldo@uniquindio.edu.co

¹Universidad del Quindío, Facultad de ciencias agroindustriales

INTRODUCCIÓN

La creciente generación de residuos agroindustriales en Colombia, particularmente en los sectores alimenticio, agrícola y forestal, plantea un serio desafío ambiental. La cáscara de cacao (*Theobroma cacao L.*), uno de los principales subproductos de la industria cacaotera, representa hasta el 90 % del peso total del fruto fresco y suele ser desechada sin tratamiento adecuado, contribuyendo a la contaminación de suelos y aguas, la emisión de gases de efecto invernadero y la proliferación de vectores biológicos (ROMERO SÁEZ, 2022). No obstante, este residuo lignocelulósico posee un perfil nutricional valioso que incluye minerales, fibra y compuestos estructurales susceptibles de ser transformados biotecnológicamente (MOLINA et al., 2024).

En este contexto, la fermentación en estado sólido (FES) se presenta como una alternativa sostenible para la valorización de la cáscara de cacao mediante el cultivo de hongos comestibles. Este tipo de fermentación emplea microorganismos que crecen sobre sustratos sólidos con baja humedad, promoviendo la producción de biomasa fúngica y metabolitos de interés agroindustrial, alimentario y farmacológico (OROZCO, 2021). Los hongos lignocelulolíticos de pudrición blanca, como *Lentinula edodes*, destacan por su capacidad de degradar lignina y utilizar celulosa y hemicelulosa como fuente de carbono (ORTIZ et al., 2020).

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la viabilidad de la cáscara de cacao variedad Corpoica TCS01 como sustrato para FES orientado a la producción de *Lentinula edodes*, mediante análisis bromatológicos, térmicos, de biodegradabilidad y de perfil mineral. Asimismo, se buscó modelar la cinética de crecimiento micelial y estudiar la generación de metabolitos secundarios, con miras a contribuir al desarrollo de procesos biotecnológicos sostenibles en el marco de una bioeconomía circular.

MATERIALES Y MÉTODOS

• Materia prima y área de estudio

Se utilizó cáscara de cacao (*Theobroma cacao L.*, variedad Corpoica TCS01), recolectada en la Hacienda Robledal, Montenegro, Quindío (Colombia). El material fue troceado, secado a 40 °C por 48 horas y molido hasta obtener un polvo homogéneo, apto para su caracterización y uso como sustrato en fermentación en estado sólido (FES).

Actividad 1: Evaluar la aptitud del sustrato

Seminário Internacional Brasil - Colômbia Sobre Processos Industriais Sustentáveis

<https://online.unisc.br/acadnet/anais/index.php/semibrasilcol/index>

Santa Cruz do Sul, 2025

- **Análisis fisicoquímico - bromatológico**

Se realizó una caracterización bromatológica de la cáscara de cacao siguiendo metodologías AOAC:

- Humedad (AOAC 934.01),
- Proteína/Nitrógeno (Kjeldahl, AOAC 984.13),
- Grasa cruda (Soxhlet, AOAC 963.15),
- Fibra cruda (AOAC 978.10),
- Cenizas (AOAC 968.08).

- **Cuantificación de minerales mediante espectroscopía de absorción atómica**

Para la determinación de minerales, se pesaron 500 mg de muestra seca y molida. Se añadieron 10 mL de ácido nítrico (HNO_3) concentrado y 5 mL de ácido clorhídrico (HCl) concentrado. Las muestras fueron dejadas en campana de extracción de gases por 15 minutos y luego sometidas a digestión asistida por microondas a 200 °C durante 15 minutos. El contenido de los tubos fue transferido a balones aforados de 50 mL, ajustando con agua destilada hasta el volumen final. Posteriormente, se analizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica (AAS, marca Thermo) para la identificación y cuantificación de elementos minerales.

- **Análisis térmico por calorimetría diferencial de barrido (DSC)**

El comportamiento térmico de la cáscara de cacao se analizó mediante calorimetría diferencial de barrido. Se utilizó una muestra seca y molida colocada en cápsulas de aluminio con tapa, con capacidad de 25 μL . Se empleó una cápsula vacía como referencia. Las condiciones del análisis incluyeron un rango de temperatura de 20 °C a 350 °C, velocidad de calentamiento de 10 K/min y atmósfera controlada con flujo de gas protector y de purga. La configuración del equipo y el procesamiento de datos se realizaron mediante el software propietario del sistema.

- **Análisis de biodegradabilidad (Producción de CO_2 por tiempo)**

La biodegradabilidad del sustrato se evaluó mediante un ensayo de respirometría basado en la norma ISO 14855. Se prepararon biorreactores en frascos herméticos, conteniendo compost seco (15 g) y 5 g de cáscara de cacao seca y molida. Los sistemas fueron incubados a $28\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ durante un periodo de 49 días. La producción de CO_2 se midió utilizando viales con NaOH 0,8 M estandarizado, seguido de titulación con HCl 0,4 M en presencia de BaCl_2 y fenolftaleína como indicador. Las mediciones se realizaron semanalmente mediante titulación ácido-base, permitiendo el monitoreo de la actividad microbiana en función de la liberación de CO_2 .

Actividad 2: Enriquecimiento del sustrato

Si el sustrato no cumple con los requerimientos físicos, químicos o nutricionales, se suplementará con nutrientes como urea (nitrógeno), citrato de calcio (calcio) o se ajustará el pH con ácidos/bases débiles. Luego, se homogeniza con un mezclador tipo V y se verifica la uniformidad mediante un índice de mezcla. Las muestras se analizarán por espectroscopía NIR para asegurar que las condiciones sean adecuadas para el crecimiento del hongo.

Actividad 3: Determinar la viabilidad de la cacota de cacao como sustrato para el cultivo de

Seminário Internacional Brasil - Colômbia Sobre Processos Industriais Sustentáveis

<https://online.unisc.br/acadnet/anais/index.php/semibrasilcol/index>

Santa Cruz do Sul, 2025

Lentinula edodes

• Evaluación de la cinética de crecimiento

Se inocularán diferentes sustratos con el hongo. Se hará seguimiento al crecimiento en las fases: incubación, colonización y fructificación. Se tomarán muestras cada 10 días durante 4 meses. Se simularán las cinéticas de crecimiento usando el software Crystal Ball. Se compararán los resultados con sustratos reportados mediante análisis estadístico.

• Determinación de la eficiencia biológica y productividad

Se determinará la eficiencia biológica (EB), Tasa de Producción (TP) y Tasa de Biodegradación (TB). También se medirá la productividad total en gramos de hongos frescos por ciclo de producción.

• Composición química y nutricional de la biomasa

Se analizarán las setas cosechadas usando métodos oficiales AOAC:

- Proteína total: Método Kjeldahl
- Grasa: Método Soxhlet (AOAC 963.15)
- Fibra dietaria total: Método AOAC 985.29
- Minerales (Fe, Zn, Mg, Cu, Na, K): Espectroscopía de absorción atómica (AOAC 968.08)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La cáscara de cacao (variedad Corpoica TCS01) mostró propiedades fisicoquímicas adecuadas como sustrato para fermentación en estado sólido con *Lentinula edodes*. Aunque presenta alta humedad inicial (81,9 %), esta se corrige mediante un secado controlado a 40 °C por 48 horas, lo que evita el deterioro microbiológico y asegura la estabilidad del material para su uso posterior (CASTRO et al., 2024).

Adicionalmente, se observó un contenido proteico relativamente bajo (0,7 g/100 g) y un contenido de nitrógeno total de 0,112 %. Esta composición implica una relación C/N elevada, probablemente superior a 60:1, lo cual puede limitar la producción de enzimas ligninolíticas y ralentizar el crecimiento inicial del hongo si no se ajusta adecuadamente (MOU et al., 2023). También se identificó un contenido de fibra cruda de 5,9 g/100 g, lo cual refuerza el carácter lignocelulósico del sustrato y su utilidad como fuente de carbono estructural en fermentación en estado sólido (LAKHTAR, 2016). Todos estos factores serán corregidos en la formulación del sustrato como parte del diseño experimental, a través de la suplementación con fuentes nitrogenadas y el ajuste del pH al rango ideal de 5,5 a 6,0, que favorece el crecimiento y la actividad enzimática de *L. edodes* (DESISA et al., 2023).

El análisis mineral del sustrato reveló concentraciones funcionales de potasio (64,3 mg/100 g), calcio (115,8 mg/100 g), hierro (11,6 mg/100 g) y zinc (6,5 mg/100 g), elementos esenciales para el crecimiento del hongo y la producción de enzimas ligninolíticas (SOARES; OLIVEIRA, 2022). También se identificaron trazas de manganeso (0,4 mg/100 g) y cobre ($\approx 0,02$ mg/100 g), micronutrientes que cumplen funciones catalíticas durante la degradación de la lignina (BELLETTINI et al., 2019).

Los análisis térmicos realizados mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) permitieron identificar transiciones térmicas típicas de matrices lignocelulósicas: evaporación de agua ligada ($\sim 153,49$ °C, $\Delta H = -196$ J/g), descomposición de hemicelulosa ($\sim 237,20$ °C, $\Delta H = -3,48$ J/g) y pirólisis de celulosa ($\sim 317,33$ °C, $\Delta H = +26,94$ J/g). Estas características térmicas aseguran que la estructura del

sustrato se mantenga estable durante el proceso fermentativo, que opera en condiciones mesófilas (30–35 °C), facilitando así una colonización micelial eficiente.

La prueba de biodegradabilidad evidenció una alta producción acumulada de CO₂ (134,99 g/g en 49 días), lo que confirma una elevada accesibilidad biológica del sustrato y su idoneidad para ser transformado por hongos de pudrición blanca. La curva de respiración mostró las fases clásicas de colonización por el hongo: latencia (0–14 días, 9,15–20,88 g CO₂/g), crecimiento exponencial (21–35 días, 33,09–89,05 g/g), fase estacionaria (42–49 días, 120,38–134,99 g/g) y declive (56 días, descenso a 127,95 g/g). Este patrón es característico de procesos de fermentación en estado sólido exitosos (MAZZEO et al., 2020). En conjunto, los resultados respaldan el potencial biotecnológico de la cáscara de cacao como sustrato alternativo en fermentación en estado sólido. Mediante su secado inicial y ajustes complementarios en la formulación (nutrientes y pH), es posible acondicionar este residuo agroindustrial para el cultivo eficiente de *Lentinula edodes* y la obtención de productos de valor agregado.

CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados confirman que la cáscara de cacao (variedad Corpoica TCS01) es un sustrato viable para fermentación en estado sólido con hongos comestibles como *Lentinula edodes*. Su composición lignocelulósica, estabilidad térmica, accesibilidad biológica y perfil mineral la hacen adecuada para la colonización por hongos de pudrición blanca. Aunque requiere ajustes de nitrógeno y pH, estos son simples y están considerados en el diseño experimental. La evolución respiratoria y la degradación observada evidencian un proceso fermentativo exitoso. Se concluye que esta cáscara es una alternativa eficiente, valorizable y sostenible.

PALABRAS CLAVE

Cáscara de cacao, sustrato, viabilidad, fermentación en estado sólido, *Lentinula Edodes*.

AGRADECIMENTOS

Agradezco a la Universidad del Quindío, al Doctorado en ciencias y al proyecto de Formación de capital humano de alto nivel denominado Becas V por el apoyo institucional brindado durante el desarrollo del presente trabajo, a mi director y codirector y asesores, al grupo de investigación INCIAM quienes con sus conocimientos y orientación han aportado significativamente al desarrollo de este proyecto.

REFERENCIAS

- BELLETTINI, Marcelo Barba et al. Factors affecting mushroom *Pleurotus* spp. *Saudi Journal of Biological Sciences*, Elsevier B.V., 1 maio 2019.
- DE CASTRO, Cibelli Paula et al. Shiitake mushroom cultivation in composted substrate: Is it possible? *Ciencia e Agrotecnologia*, v. 48, 2024.
- DESISA, Buzayehu et al. Substrate optimization for Shiitake (*Lentinula edodes* (Berk.) Pegler) mushroom production in Ethiopia. *Journal of Fungi*, v. 9, n. 8, 1 ago. 2023.

LAKHTAR, Hicham; ROUSSOS, Sevastianos. Solid state fermentation of *Lentinula edodes* on solid olive substrate: Evaluation of growth factors. *Journal of Applied Sciences*, v. 16, n. 12, p. 562–569, 2016.

MAZZEO, Dânia Elisa Christofolletti et al. Effects of biostimulation by sugarcane bagasse and coffee grounds on sewage sludges, focusing agricultural use: Microbial characterization, respirometric assessment and toxicity reduction. *Waste Management*, v. 118, p. 110–121, 1 dez. 2020.

MOLINA PINZA, Maria Soledad et al. Bromatological evaluation of cocoa shell flour and nacedero in the formulation of a balanced. *RECIENA (Revista Científica Agropecuaria)*, v. 4, n. 2773–7608, p. 78–87, 2024.

MOU, Chunye et al. Comparative analysis of simulated in-situ colonization and degradation by *Lentinula edodes* on oak wafer and corn stalk. *Frontiers in Microbiology*, v. 14, 2023.

OROZCO CABALLERO, Jenniffer Natalia. Aprovechamiento y transformación de la cascara de cacao. Fusagasugá, Colombia: [s.n.].

ORTIZ GARCÍA, Juan Esteban et al. Alternativa de biorremediación a partir de residuos de cacao en la obtención de hongos *Pleurotus ostreatus* con la implementación de un análisis multicriterio. *Revista ION*, v. 33, n. 1, 26 jun. 2020.

ROMERO SÁEZ, Manuel. Los residuos agroindustriales, una oportunidad para la economía circular. *TecnoLógicas*, v. 25, 20 set. 2022.

SOARES, Thiago F.; OLIVEIRA, M. Beatriz P. P. Cocoa by-products: Characterization of bioactive compounds and beneficial health effects. *Molecules*, MDPI, 1 mar. 2022.