

Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

Evaluación de la composición nutricional, degradación *in vitro* y potencial de fermentación del huitlacoche (*Ustilago maydis*) recolectado en distintas localidades de Chiapas

Evaluation of the nutritional composition, *in vitro* degradation and fermentation potential of the huitlacoche (*Ustilago maydis*) collected in different locations in Chiapas

Authors/Autores: Noyola-Méndez, L., Albores-Moreno, S., Mariaca-Méndez, R., Ruan-Soto, F., Cano-Contreras, E.J.

ID: e2071

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e2071>

Received/Fecha de recepción: January 06th 2025

Accepted /Fecha de aceptación: March 26th 2026

Available online/Fecha de publicación: May 20th 2026

Please cite this article as/Como citar este artículo: Noyola-Méndez, L., Albores-Moreno, S., Mariaca-Méndez, R., Ruan-Soto, F., Cano-Contreras, E.J. (2026). Evaluation of the nutritional composition, *in vitro* degradation and fermentation potential of the huitlacoche (*Ustilago maydis*) collected in different locations in Chiapas. *Revista Bio Ciencias*, 13, e2071. <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e2071>

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.

Artículo original

Evaluación de la composición nutricional, degradación *in vitro* y potencial de fermentación del huitlacoche (*Ustilago maydis*) recolectado en distintas localidades de Chiapas

Evaluation of the nutritional composition, *in vitro* degradation and fermentation potential of the huitlacoche (*Ustilago maydis*) collected in different locations in Chiapas

Huitlacoche en la ganadería/Corn smut in livestock

Noyola-Méndez¹, L., Albores-Moreno, S.^{1*}, Mariaca-Méndez, R.¹, Ruan-Soto, F.², Cano-Contreras, E.J.³

¹ Colegio de la Frontera Sur, Carretera Panamericana y Periférico Sur s/n Barrio María Auxiliadora, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, CP 29290, México.

² Instituto de Ciencias Biológicas, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Libramiento Norte Poniente No. 1150, Colonia Lajas Maciel, C.P. 29039. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

³ Escuela de Arqueología, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Camino Antiguo a San Gabriel S/N, Chiapa de Corzo, Chiapas, México. C.P. 29160

*Corresponding Author:

*Samuel Albores-Moreno¹ Departamento Agricultura, Sociedad y Ambiente Grupo Ganadería Sustentable y Cambio Climático del Colegio de la Frontera Sur, Carretera Panamericana y Periférico Sur s/n Barrio María Auxiliadora, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, CP 29290, México. E. mail: Correo: samuel.albores@ecosur.mx

RESUMEN

El objetivo fue evaluar la composición química, digestibilidad *in vitro* y producción de gases fermentativos, del huitlacoche con el fin de determinar su viabilidad como suplemento en dietas para ovinos. Se recolectaron muestras en tres localidades de Chiapas: San Cristóbal de Las Casas, Chamula y Playón La Gloria. Se analizó su contenido de materia seca (DM), proteína cruda (CP), fibra cruda (CF), extracto etéreo (EE), carbohidratos (C), cenizas (Ash) y valor energético (GE), taninos condensables (CT) y fenoles totales (TF); adicionalmente, se aplicó la técnica de producción de gas *in vitro*, para las variables como volumen total (Vt), tasas de fermentación (S), fase de retardo (L), digestibilidad *in vitro* de materia seca (IVDMD) e índice de producción de gas fermentado (FGPI). Los valores de CP oscilaron entre 10.56 y 14.53 g/100g y los de C entre 59.03 y 60.46 g/100g, para la GE, CT y TP oscilaron entre 298.6–321.8 kcal, 42.60–67.46 g/100g y 217.21–308.61 g/100g, respectivamente. El huitlacoche de Chamula presentó la menor producción de gas (107.7 mL) y

menor digestibilidad (27.27 %), mientras que el de San Cristóbal mostró mayor volumen (377.92 mL) y VDMD (84.58 %). Algunas muestras de huitlacoche mostraron, a nivel *in vitro*, una composición nutricional y un patrón de fermentación compatibles con su uso potencial como suplemento en dietas de ovinos.

PALABRAS CLAVE:

Valor nutricional, fermentación, ovinos.

ABSTRACT

The objective of this study was to assess the chemical composition, *in vitro* digestibility, and fermentative gas production of huitlacoche to determine its potential as a supplement in sheep diets. Samples were collected from three localities in Chiapas: San Cristóbal de Las Casas, Chamula, and Playón La Gloria. The contents of dry matter (DM), crude protein (CP), crude fiber (CF), ether extract (EE), carbohydrates (C), ash (Ash), and gross energy (GE), along with condensed tannins (CT) and total phenols (TP), were analyzed. Additionally, the *in vitro* gas production method was used to evaluate variables such as total gas volume (Vt), fermentation rate (S), lag phase (L), *in vitro* dry matter digestibility (IVDMD), and the fermented gas production index (FGPI). CP values ranged from 10.56 to 14.53 g/100 g, and C values from 59.03 to 60.46 g/100 g. GE, CT, and TP ranged from 298.6 to 321.8 kcal, 42.60 to 67.46 g/100 g, and 217.21 to 308.61 g/100 g, respectively. Huitlacoche from Chamula showed the lowest gas production (107.7 mL) and digestibility (27.27 %), while samples from San Cristóbal exhibited the highest gas volume (377.92 mL) and IVDMD (84.58 %). Some huitlacoche samples demonstrated, at the *in vitro* level, a nutritional composition and fermentation pattern compatible with their potential use as a supplement in sheep diets.

KEY WORDS:

Nutritional value, fermentation, sheep.

Introducción

Frente al escenario actual de degradación ambiental, inseguridad alimentaria y encarecimiento de insumos agropecuarios, la búsqueda de estrategias sustentables dentro de los sistemas agrícolas y pecuarios se ha vuelto prioritaria (FAO, 2022; IPCC, 2023). En este marco, el aprovechamiento de subproductos agroalimentarios representa una vía prometedora para mejorar la eficiencia productiva, reducir costos y fomentar la circularidad de los recursos. Uno de estos recursos es el huitlacoche (*Ustilago maydis*), un hongo basidiomiceto que parasita cultivos de maíz (*Zea mays*) y teocintle (*Zea spp.*), tradicionalmente valorado por sus atributos gastronómicos y culturales en regiones del centro de México (Juárez-Montiel *et al.*, 2011; Villagrán *et al.*, 2023).

Más allá de su importancia culinaria, estudios recientes han comenzado a explorar el huitlacoche desde una perspectiva agroecológica. Se ha destacado su aporte a la soberanía alimentaria campesina (Rodríguez-Flores *et al.*, 2021), su potencial como bioindicador de la sanidad de los cultivos (Monár-Barragán *et al.*, 2019), e incluso como fuente de compuestos bioactivos. Sin embargo, no existen estudios publicados que evalúen el huitlacoche como ingrediente en dietas para ruminantes, representando un vacío de conocimiento importante.

Por otra parte, la ganadería de traspatio constituye un componente clave de los sistemas de subsistencia en comunidades rurales, especialmente en el sureste de México. Los ovinos, por su

adaptabilidad, tamaño y demanda de mercado, se crían comúnmente en huertos familiares y milpas, alimentados con forrajes, residuos agrícolas y otros insumos locales (Alayón-Gamboa, 2015; Mariaca, 2013). No obstante, la dependencia de alimentos balanceados comerciales sigue siendo una limitante debido a su elevado costo y a su disponibilidad, que representa un 80 % de los costos de este rubro. En este contexto, diversos estudios han evaluado el uso de hongos del género *Pleurotus* spp. como tratamiento de sustratos destinados a la alimentación de animales de interés agropecuario. Por su parte, Montañez *et al.* (2004) emplearon *Pleurotus florida* en paja de trigo para analizar su efecto sobre la flora ruminal de ovinos, y reportaron un incremento en la concentración de proteína cruda y materia orgánica en la paja tratada con 8.50 % en comparación con la no tratada de 3.36 %. De manera concordante, Coronel & Martínez (1995) observaron un mayor coeficiente de digestibilidad en paja de cebada tratada con *Pleurotus ostreatus*.

Un aspecto relevante a considerar en el estudio de la composición química del huitlacoche es la variabilidad reportada en su composición proximal en la literatura. Esta variación puede atribuirse a diversos factores, entre ellos las condiciones agroecológicas, la época del año, el tipo de maíz, la cepa de *U. maydis*, la etapa de muestreo, entre otros (Castañeda *et al.*, 2016). Desde el punto de vista nutricional, el huitlacoche presenta un perfil de interés, caracterizado por un alto contenido de carbohidratos (54–65 g/100 g), proteínas (12–14 g/100 g), así como lípidos y fibra (Beas *et al.*, 2011; Valdez-Morales *et al.*, 2010^a). Adicionalmente, contiene compuestos fenólicos, como los ácidos cafeicos, p-cumárico y ferúlico, así como taninos condensados, los cuales han mostrado potencial actividad antimicrobiana y capacidad moduladora de la fermentación ruminal (Andrade-Rivero *et al.*, 2012; Castillo-González *et al.*, 2014). Los taninos, cuando se encuentran en bajas concentraciones (0–3 % de la materia seca), pueden ejercer efectos benéficos; sin embargo, en concentraciones superiores (>3 % de la materia seca) pueden inhibir a la microbiota ruminal. Por ello, se ha propuesto su uso como estrategia para reducir las emisiones de metano y mejorar la eficiencia digestiva (Andrade-Rivero *et al.*, 2012).

No obstante, también se han reportado riesgos asociados a su consumo, como la presencia de micotoxinas (aflatoxinas, fumonisinas y deoxinivalenol) en huitlacoche fresco o enlatado, derivadas de la contaminación por hongos de los géneros *Fusarium*, *Aspergillus* y *Penicillium* (Villagrán *et al.*, 2023). Esto hace indispensable evaluar cuidadosamente su inocuidad antes de su inclusión en dietas para rumiantes.

El objetivo de este estudio fue evaluar la composición química, la digestibilidad *in vitro* y la producción de gases fermentativos del huitlacoche recolectado en tres localidades de Chiapas, con la finalidad de determinar su potencial como suplemento alimenticio en dietas para ovinos en sistemas de ganadería de traspatio. Asimismo, se consideró la presencia de compuestos bioactivos como taninos y fenoles totales, así como su posible influencia sobre la fermentación ruminal.

Material y Métodos

Sitio de estudio

El presente experimento se realizó en los Laboratorios Institucionales de Bromatología Ambiental y de Ganadería y Cambio Climático del Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Unidad San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México. Se recolectaron muestras de huitlacoche (*Ustilago maydis*) en tres localidades del estado de Chiapas: San Cristóbal de Las Casas (HSC), Chamula (HC) y Playón la Gloria (HS). Las dos primeras forman parte de la región de los Altos de Chiapas, que se caracteriza por ubicarse en un macizo montañoso en el centro de Chiapas (Mariaca *et al.*, 2007). Su clima es tropical de altura y se caracteriza por tener una temperatura templada (18–22°C), con condiciones subhúmedas con lluvias todo el año (1200–1800 mm) (Mariaca *et al.*, 2007). En el caso de Playón la Gloria, este se encuentra en la parte sur de la Selva Lacandona, colindando con la Reserva de Montes Azules y con la ribera sur del Río Lacantún. (Mariaca *et al.*, 2008), con un tipo

de vegetación de selva alta perennifolia, clima húmedo y altitud de 140 a 260 m (Ruan-Soto, 2005). En Chiapas no existe una tradición de consumir huitlacoche o de cultivarlo, por lo que la recolecta de la muestra fue de huitlacoche silvestre que se encontraba de forma oportunística. La recolecta se realizó durante los ciclos agrícolas de otoño 2022 y otoño 2023. Las muestras de San Cristóbal de Las Casas fueron recolectadas en noviembre de 2022, las de Playón de Gloria en septiembre de 2023 y las de Chamula en noviembre de 2023.

Preparación de las muestras

Tras la identificación morfológica, las agallas de huitlacoche fueron desgranadas y deshidratadas en dos etapas: inicialmente, en una deshidratadora eléctrica (Hamilton Beach 32100A) a 55 °C durante 24 h, y posteriormente, en una estufa de secado a 60–65 °C durante 24 a 48 h, hasta asegurar la completa eliminación de humedad. Las muestras secas fueron molidas hasta obtener una harina homogénea. Para el análisis proximal, de fermentación *in vitro* y de compuestos antinutricionales, se elaboró una muestra compuesta, integrando una mezcla homogénea a partir de las muestras recolectadas en cada una de las comunidades de origen; de esta mezcla se tomó una alícuota representativa para cada determinación analítica, las cuales se realizaron por triplicado como réplicas técnicas.

Análisis de composición química

A cada muestra se determinó su contenido de nitrógeno (N), por combustión en un analizador LECCO CN- 2000 (Serie 3.740; LECCO Corporation); materia orgánica (OM) por la combustión de las muestras en mufla a 600 °C durante 6 h (AOAC, 2023), Energía bruta (GE) (Giraldo *et al.*, 2007), y Fibra bruta (Van Soest *et al.*, 1991).

Evaluación de digestibilidad *in vitro*

Se aplicó la técnica de producción de gas *in vitro* según Menke & Steingass (1988), con modificaciones de Theodorou *et al.* (1994). Se colocaron 500 mg de muestra molida y seca en frascos ámbar de 125 mL, se adicionaron 90 mL de inóculo ruminal y se sellaron con tapones herméticos. Los frascos fueron incubados a 39 °C y se mantuvieron bajo atmósfera de CO₂. El inóculo ruminal se obtuvo de tres rumiantes alimentados con dieta base de 30 % concentrado, 35 % paja de avena y 35 % alfalfa, después de 14 h de ayuno. La obtención de líquido ruminal mediante sonda esofágica se realizó como un procedimiento mínimamente invasivo, priorizando la reducción del estrés y la integridad física de los ovinos. El manejo de los animales se ajustó a lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-062-ZOO-1999, así como a los principios de las 3R, garantizando en todo momento un trato humanitario; dada a la naturaleza no quirúrgica del procedimiento y a que se trata de una técnica de uso rutinario en la práctica de la medicina veterinaria, no fue necesaria la aprobación de un comité de ética específico. El líquido ruminal fue filtrado con ocho capas de gasa y mezclado con una solución mineral reducida en proporción 1:10 (Krishnamoorthy *et al.*, 2005). Se midió la presión de gas a intervalos predeterminados (0–72 h) y se convirtió a volumen (mL g⁻¹) usando la ecuación de Elmasry *et al.* (2016): $V = (P + 0.0186) / 0.0237$.

Cinética de fermentación

Se estimaron los parámetros cinéticos de fermentación (V_m, S y L) mediante el modelo logístico de Schofield & Pell (1995), utilizando el procedimiento NLIN de SAS (2006). También se determinaron los volúmenes fermentativos en intervalos (V_{f0–8}, V_{f8–24}, V_{f24–72}) y las fracciones fermentativas (FR, FM, FL) según Miranda *et al.* (2015). La suma de estas fracciones constituyó la fracción fermentable total (TF). Finalmente, se calculó el índice de potencial de emisión de gases por gramo de materia orgánica digestible (FGPI).

Determinación de IVDMD

Tras 72 h de fermentación, los residuos de las muestras fueron filtrados mediante un embudo Büchner utilizando papel filtro rápido (Mod. 617, Código P.V. No. 1034). La digestibilidad *in vitro* de

la materia seca (IVDMD) se calculó con base en la materia seca inicial, mediante el secado de los residuos a 60 °C durante 48 h, de acuerdo con lo descrito por [Monforte et al. \(2005\)](#). Los valores de IVDMD se corrigieron con base en los residuos obtenidos en los blancos de incubación, a fin de excluir el aporte de la fracción no atribuible a la fermentación del sustrato.

Análisis de compuestos tóxicos cualitativos

Se analizaron los siguientes factores antinutricionales: taninos condensados, mediante extracción con metanol absoluto, utilizando catequina como estándar (1 mg/mL) y lectura a 500 nm por espectrofotometría UV-Vis, con una curva de calibración de seis puntos ([Renaud et al., 1987](#)); fenoles totales, mediante extracción con metanol al 30 %, empleando ácido gálico como estándar (5 mg/mL) y lectura a 765 nm, con una curva de cinco puntos ([AOAC, 2023](#)); y saponinas y alcaloides, los cuales fueron identificados mediante métodos cualitativos estándar ([González-Yépez, 2018](#)). Todos los análisis se realizaron por duplicado, conforme al procedimiento estándar del laboratorio, y los resultados se expresaron como el promedio de ambas determinaciones.

Diseño experimental y análisis estadístico

Las variables de fermentación (V, S, L, V8, V24, V72, IVDMD, FGPI) se analizaron con el modelo lineal general empleando el paquete estadístico SAS (versión 9; 2006), en un diseño completamente al azar, con tres tratamientos (HC, HSC y HS) y tres repeticiones por cada tratamiento. Las medias de los tratamientos se compararon mediante comparaciones múltiples de Tukey y las pruebas estadísticas se consideraron significativas cuando $p < 0.05$ ([Montgomery, 2013](#)). Se realizó un análisis de correlación de Pearson para los componentes químicos (Proteínas, Fibra cruda, Grasa, Carbohidratos y Kcal) y las variables de fermentación, usando el paquete estadístico Rstudio (versión 3.3.2, 2016-10-31).

Resultados y Discusión

Composición química y factores nutricionales

Como se observa en la Tabla 1 las muestras de huitlacoche (*Ustilago maydis*) de las tres localidades presentaron composiciones químicas dentro de los rangos reportados en la literatura ([Beas et al., 2011](#); [Valdez-Morales et al., 2010^a](#); [Valverde et al., 1995](#)). La muestra de Chamula presentó el mayor contenido de materia seca (95.95 g/100g), lo que implica una mayor concentración de nutrientes por unidad de peso, en comparación con la muestra de San Cristóbal (85.07 g/100g) y la de Playón de la Gloria (89.25 g/100g).

El contenido de proteína cruda fue de 10.56 g/100g en San Cristóbal con una desviación estándar (SD) de 0.34, 14.54 g/100g en Chamula (SD: 0.27) y 11.55 g/100g (SD: 0.46) en Playón de la Gloria, los tres por encima del mínimo requerido (7–9 g/100g de DM) para mantener la actividad microbiana ruminal ([NRC, 2016](#)). Sin embargo, sólo Chamula se aproxima al umbral de 15–16 g/100g recomendado para cubrir los requerimientos de animales en lactancia o crecimiento ([Norton, 1982](#)). En cuanto a la fibra cruda, los valores fueron bajos (8.24–11.38 g/100g), indicando una buena digestibilidad y sin limitaciones para el consumo voluntario ([Van Soest, 1965](#)).

La proporción de carbohidratos fermentables fue adecuada en las tres muestras (59.03–60.46 g/100g), lo cual favorece la producción de energía microbiana en el rumen ([Van Soest, 1994](#)). El contenido de extracto etéreo fue bajo (2.25–2.43 g/100g), lo que evita el riesgo de inhibición de bacterias celulolíticas ([NRC, 2016](#)). Finalmente, las cenizas (4.24–6.85 g/100g) reflejan una apreciable contribución mineral, y el valor energético osciló entre 298.6 y 321.8 kcal/100g, siendo superior en la muestra de Chamula.

Tabla 1. Composición nutrimental y contenido energético del huitlacoche (*Ustilago maydis*) en las tres localidades de Chiapas.

| Muestra/Referencia | Materia seca g/100g | Concentración de materia orgánica g/100g | Proteína cruda g/100g | Fibra cruda g/100g | Extracto etéreo (grasa) g/100g | Carbohidratos g/100g | Taninos condensables g/100g | Fenoles totales mg/100g | Valor energético | |
|--|------------------------|---|-----------------------------|--------------------------|---|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------|------------------------|
| | | | | | | | | | Kcalorías | Kjoule |
| Huitlacoche San Cristóbal de Las Casas | 85.06 SD:0.02 | 4.24 SD:0.08 | 10.56 SD:0.34 | 8.23 SD:0.02 | 2.24 SD:0.00 | 59.02 SD:0.44 | 67.46 SD:0.28 | 217.21 SD:0.87 | 298.60 SD:0.38 | 1249.37 SD:1.37 |
| Huitlacoche Chamula | 95.948 SD:0.00 | 6.85 SD:0.12 | 14.53 SD: 0.27 | 11.37 SD:0.14 | 2.42 SD:0.14 | 60.46 SD:0.43 | 67.81 SD:0.35 | 216.62 SD:0.38 | 321.86 SD:0.62 | 1346.69 SD: 2.21 |
| Huitlacoche Playón de la Gloria | 89.25 SD:0.06 | 4.36 SD:0.11 | 11.55 SD: 0.46 | 9.11 SD:0.46 | 2.33 SD:0.04 | 59.16 SD:0.43 | 42.60 SD:0.92 | 308.61 SD:0.28 | 299.81 SD:0.54 | 1254.40 SD: 1.96 |

Cinética de fermentación ruminal

Los resultados de la producción de gas mostraron diferencias significativas entre los tratamientos, con excepción del índice de producción de gas fermentado (FGPI) y la fase de latencia (L). El huitlacoche de Chamula presentó un perfil fermentativo más lento y estable, con un volumen total de gas de solo 107.7 mL, significativamente menor que San Cristóbal (377.9 mL) y Playón de la Gloria (287.0 mL) ($p < 0.05$) (ver Tabla 2). Este comportamiento puede reflejar una menor fermentabilidad de los componentes estructurales, pero también una menor predisposición a cuadros de acidosis ruminal subaguda (Owens *et al.*, 1998).

La tasa de fermentación (S) fue más baja en HC (0.03 h^{-1}), mientras que HSC y HS presentaron tasas similares ($0.04\text{--}0.05 \text{ h}^{-1}$). El volumen acumulado a 24 horas (V24) —indicador clave de fermentación rápida— fue marcadamente superior en San Cristóbal (212.9 mL), seguido de Playón de la Gloria (164.5 mL) y muy reducido en Chamula (38.2 mL), lo que se alinea con el mayor contenido energético y proteico de HSC a lo largo del tiempo.

La digestibilidad *in vitro* de materia seca (IVDMD) presentó diferencias altamente significativas entre tratamientos ($p < 0.05$), siendo superior en la muestra de San Cristóbal (84.58 %), intermedia en Playón de la Gloria (59.83 %), y marcadamente baja en Chamula (27.27 %). Este comportamiento refleja una clara variabilidad en la calidad fermentativa del huitlacoche en función del sitio de recolección, posiblemente relacionada con diferencias edafoclimáticas, madurez fisiológica o prácticas agrícolas locales (Valdez-Morales *et al.*, 2010^b).

Tabla 2. Parámetros de la cinética de producción de gas, fermentación y digestibilidad *in vitro* de la materia seca e índice potencial de emisión de gas del huitlacoche (*Ustilago maydis*) de las tres localidades de Chiapas

| Tratamiento | V | S | L | V8 | V24 | V72 | IVDMD | FGPI |
|-------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| HC | 107.7 ± 14.03 ^c | 0.03 ± 0.0014 ^b | 2.55 ± 1.03 ^a | 22.91 ± 6.78 ^b | 38.15 ± 6.55 ^c | 55.29 ± 7.07 ^c | 27.27 ± 0.78 ^c | 399.67 ± 42.69 ^a |
| HSC | 377.92 ± 14.03 ^a | 0.04 ± 0.0014 ^a | 6.05 ± 1.03 ^a | 63.66 ± 6.78 ^a | 212.91 ± 6.55 ^a | 133.69 ± 7.07 ^a | 84.58 ± 0.78 ^a | 446.46 ± 42.69 ^a |
| HS | 287.03 ± 14.03 ^b | 0.05 ± 0.0014 ^a | 5.38 ± 1.03 ^a | 55.71 ± 6.78 ^a | 164.5 ± 6.55 ^b | 86.98 ± 7.07 ^b | 59.83 ± 0.78 ^b | 480.01 ± 42.69 ^a |

^{a b c} Las medias a lo largo de la misma columna, con diferentes superíndices, son significativamente diferentes.

HC=Huitlacoche de Chamula, HSC=Huitlacoche de San Cristóbal de Las Casas, HS=Huitlacoche de Playón de la Gloria

Estas diferencias en IVDMD están estrechamente relacionadas con la producción acumulada de gas a distintas horas, lo que constituye un reflejo dinámico de la fermentabilidad del sustrato. En la muestra de San Cristóbal, los volúmenes a las 8 h (V8 = 63.66 mL), 24 h (V24 = 212.91 mL) y 72 h (V72 = 133.69 mL) revelan una fermentación rápida, sostenida y eficiente, probablemente

impulsada por un buen equilibrio entre proteína cruda disponible y carbohidratos solubles, lo que promueve un entorno favorable para la actividad microbiana (Hoover & Stokes, 1991).

Por el contrario, la muestra de Chamula, con valores notablemente bajos (V8 = 22.91 mL; V24 = 38.15 mL; V72 = 55.29 mL), evidencia una fermentación limitada, posiblemente afectada por un mayor contenido de fibra lignificada o de compuestos antinutricionales, como taninos, que pueden reducir la biodisponibilidad de proteínas y ralentizar el proceso fermentativo (Makkar, 2003; Mueller-Harvey, 2006).

La muestra de Playón de la Gloria mostró un perfil intermedio de producción de gas (V8 = 55.71 mL; V24 = 164.5 mL; V72 = 86.98 mL), lo que se traduce en una digestibilidad moderada, compatible con un perfil químico menos concentrado en proteína, pero con adecuada disponibilidad energética. Diversos estudios han señalado que una producción intermedia de gas durante la fermentación *in vitro* suele asociarse con sustratos de digestibilidad media y con una proporción equilibrada entre fracciones estructurales y no estructurales de los carbohidratos (Menke & Steingass, 1988; Getachew *et al.*, 2000). Asimismo, se ha reportado que la disponibilidad energética del sustrato y el contenido proteico per se influyen de manera significativa en la cinética de fermentación ruminal y en la producción acumulada de gas (Blümmel & Ørskov, 1993).

Las correlaciones observadas entre los parámetros químicos y la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (IVDMD) refuerzan las tendencias identificadas en el estudio (ver Tabla 3). No obstante, estas asociaciones deben interpretarse dentro del contexto del tamaño del conjunto de datos analizado. Se observaron correlaciones positivas y altamente significativas entre la IVDMD y el contenido de proteína cruda ($r = 0.992$; $p < 0.01$), fibra cruda ($r = 0.997$; $p < 0.01$) y energía metabolizable ($r = 0.998$; $p < 0.01$). Estos hallazgos son consistentes con lo reportado por Getachew *et al.* (2000), quienes señalan que una mayor densidad energética y un mayor aporte de nitrógeno favorecen la disponibilidad de nutrientes para la microbiota ruminal, lo que se refleja en una mejor digestión de la materia seca.

Tabla 3. Matriz de correlación entre la composición química, las constantes de producción de gas y la digestibilidad *in vitro* de materia seca.

| | Proteínas | Fibra cruda | Grasa | Carbohidratos | Kcal |
|-------|----------------------|-------------|---------|---------------|---------|
| V | 0.99035 ^A | 0.99783 | 0.82604 | 0.91025 | 0.99839 |
| | 0.0096 ^B | 0.0022 | 0.1740 | 0.0897 | 0.0016 |
| S | 0.99019 | 0.98105 | 0.88944 | 0.80185 | 0.97483 |
| | 0.0098 | 0.0189 | 0.1106 | 0.1981 | 9.9252 |
| L | 0.68649 | 0.63307 | 0.42643 | 0.40037 | 0.6173 |
| | 0.3135 | 0.3135 | 0.5736 | 0.5996 | 0.3827 |
| V8 | 0.86366 | 0.87513 | 0.95891 | 0.72083 | 0.87224 |
| | 0.1363 | 0.1249 | 0.0411 | 0.2792 | 0.1278 |
| V24 | 0.9961 | 0.99983 | 0.82276 | 0.90002 | 0.99931 |
| | 0.0039 | 0.0002 | 0.1772 | 0.1000 | 0.0007 |
| V72 | 0.9619 | 0.97377 | 0.66348 | 0.96363 | 0.97873 |
| | 0.0381 | 0.0262 | 0.3365 | 0.0364 | 0.0213 |
| IVDMD | 0.99238 | 0.99749 | 0.77087 | 0.92353 | 0.99846 |
| | 0.0076 | 0.0025 | 0.2291 | 0.0765 | 0.0015 |

A: Coeficiente de correlación; B: Valor de p ($p < 0.05$). V: Volumen; S: Tasa de fermentación; L: Fase de retardo; V8: Volumen a las 8 horas; V24: Volumen a las 24 horas; V72: Volumen a las 72 horas; IVDMD: Digestibilidad *in vitro* de materia seca; FGPI: Índice de producción de gas fermentado.

Biológicamente, el comportamiento observado en la cinética de fermentación *in vitro* podría estar asociado con diferencias en la accesibilidad del sustrato para la microbiota ruminal, particularmente en matrices que combinan fracciones proteicas solubles y carbohidratos estructurales

potencialmente fermentables, lo que favorecería una colonización microbiana progresiva bajo condiciones controladas (Stern *et al.*, 1994; Zhang *et al.*, 2020). Adicionalmente, la producción de gas (V72) en muestras con mayor digestibilidad *in vitro* de la materia seca (IVDMD) sugiere que el sustrato mantuvo su capacidad fermentativa durante el periodo de incubación, lo cual es consistente con la degradación gradual de materiales en sistemas *in vitro* (Patra & Saxena, 2011; Van Soest, 1994). En relación con los factores antinutricionales, se detectaron concentraciones elevadas de taninos condensados y fenoles totales, expresadas en función de la materia seca de las muestras. De acuerdo con Makkar (2003), el efecto de estos compuestos sobre la fermentación ruminal depende de su concentración y naturaleza química. En este sentido, y considerando que los valores reportados corresponden a la composición del sustrato y no a niveles de inclusión en la dieta, no es posible establecer comparaciones directas con los umbrales de consumo propuestos en la literatura (Albores-Moreno *et al.*, 2018).

Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que el huitlacoche (*Ustilago maydis*), evaluado en condiciones *in vitro*, presenta una composición química y un comportamiento fermentativo variables según la región de origen. En este sentido, el huitlacoche mostró, a nivel *in vitro*, una composición nutricional y un patrón de fermentación compatibles con su uso potencial como suplemento en dietas de ovinos. Especialmente, la muestra procedente de San Cristóbal de Las Casas destacó por su mayor digestibilidad *in vitro* de la materia seca, una mayor producción de gas y un equilibrio favorable entre proteína cruda, carbohidratos fermentables y energía. El huitlacoche recolectado en Chamula presentó una menor digestibilidad *in vitro* y una cinética de fermentación lenta. Una limitación del presente estudio fue la ausencia de análisis de micotoxinas, por lo que resulta indispensable realizar dicha evaluación antes de considerar cualquier recomendación práctica para su uso en la alimentación de ovinos.

Contribución de los autores

“Conceptualización del trabajo, R: M. M., F.R.S., E.J.C.C., S.A.M. y L.N.M.; desarrollo de la metodología, S.A.M. y F.R.S. y L.N.M.; manejo de software, S.A.M. y L.N.M.; validación experimental, S.A.M.; análisis de resultados, R: M. M., F.R.S., E.J.C.C., S.A.M. y L.N.M.; escritura y preparación del manuscrito, R: M. M., F.R.S., E.J.C.C., S.A.M. y L.N.M.; redacción, revisión y edición, S.A.M. y L.N.M.; administrador de proyectos, R: M. M., F.R.S., E.J.C.C. y S.A.M.; adquisición de fondos, R: M. M., F.R.S., S.A.M. y L.N.M.

“Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.”

Financiamiento

Esta investigación fue financiada con recursos de ECOSUR y la UNICACH, así como también formo parte del Programa de Becas de CONACYT, CVU 783990.

Agradecimientos

Al señor Manuel Portillo de la comunidad de Chamula, Chiapas y a Rubén Jiménez y Ana Rodríguez de la comunidad de Playón de la Gloria por facilitar la recolección de las muestras y enriquecer con su conocimiento la investigación.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés”.

Referencias

- Alayón-Gamboa, J. (2015). Ganadería de traspatio en la vida familiar. *Ecofronteras*, 19 (54), 6-9. ISSN 2007-4549. <https://revistas.ecosur.mx/ecofronteras/index.php/eco/article/view/1578>
- Albores-Moreno, S., Alayón-Gamboa, J., Miranda-Romero, L., Jiménez-Ferrer, G., Ku-Vera, J., & Vargas-Villamil, L. (2018). Nutritional composition, *in vitro* degradation and potential fermentation of tree species grazed by ruminants in secondary vegetation (acahual) of deciduous forest. *The Journal of Animal & Plant Sciences*, 28 (5), 1263-1275. ISSN: 1018-7081. <https://thejaps.org.pk/AbstractView.aspx?mid=2018-JAPS-506>
- Andrade-Rivero, E., Martínez-Campos, A., Castelán-Ortega, O., Ríos-Quezada, J., Pacheco-Ortega, Y., & Estrada-Flores, J. (2012). Producción de metano utilizando plantas taníferas como sustrato en fermentación ruminal *in vitro* y efecto de extractos fenólicos en la microflora ruminal. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 15 (2), 301 – 312. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/841>
- Association of Official Analytical Chemists [AOAC]. (2023). Official Methods of Analysis of AOAC International. 22nd Edition. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/9780197610145.001.0001>
- Beas, R., Loarca, G., Gusmán, S., Rodríguez, M., Vasco, N., & Guevara, F. (2011). Potencial nutraceutico de componentes bioactivos presentes en huitlacoche de la zona centro de México. *Revista mexicana de ciencias farmacéuticas*, 42 (2). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-01952011000200006
- Castañeda de León, V., Martínez-Carrera, D., Morales, P., Sobal, M., Gil, A., & Leal, H. (2016). El huitlacoche, producto de la interacción *Ustilago maydis*- maíz, una aportación de México al mundo en el sistema agroalimentario microbiano. In Martínez-Carrera, D., & Ramírez-Cienca, J. Tecnología e Innovación en el Sistema Agroalimentario de México. (pp.193-222). Ed. Colegio de Postgraduados-AMC- CONACYT-UPAEP-IMINAP. https://hongosmedicinalesytusalud-cb-hcfm.com/documentoinv/2016_Sobal%20%20Mart%C3%ADnez-Carrera_Recursos%20gen%C3%A9ticos.pdf
- Castillo-González, A., Burrola-Barraza, M., Domínguez-Viveros, J., & Chávez-Martínez, A. (2014). Rumen microorganisms and fermentation. *Austral journal of veterinary sciences*, 46, 349-361. <http://dx.doi.org/10.4067/S0301-732X2014000300003>
- Coronel, R., & Martínez, J. (1995). Efecto de la inoculación del hongo comestible *Pleurotus ostreatus* sobre el valor nutricional de la paja usada en la alimentación de rumiante. Tesis de Licenciatura. Departamento de Zootecnia. UACH. Chapingo, México. 111 pp. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/PER01000083418>
- The Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2022). Forest and farm facility. Annual Report. https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/forest_farm_facility/Files/short_report_Final2b_medium.pdf
- Getachew, G., Makkar, H., & Becker, K. (2000). Tannins in Tropical Browsers: Effects on *in vitro* Microbial Fermentation and Microbial Protein Synthesis in Media Containing Different Amounts of Nitrogen. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(8), 3581-8. <https://doi.org/10.1021/jf990740v>
- Giraldo, L., Gutiérrez, L., & Rúa, C. (2007). Comparación de dos técnicas *in vitro* e *in situ* para estimar la digestibilidad verdadera en varios forrajes tropicales. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20, 269-279. doi:[10.17533/udea.rccp.324150](https://doi.org/10.17533/udea.rccp.324150)

González-Yépez, R. (2018). Introducción a la Toxicología de alimentos: una perspectiva global. *CATEDEA*, 2, 37-55. <https://revistas.uclave.org/index.php/catedea/article/view/903>

Hoover, W., & Stokes, S. (1991). Balancing carbohydrates and proteins for optimum rumen microbial yield. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3630–3644. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78553-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78553-6)

The Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2023) Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*. IPCC, Geneva, Switzerland, 35-115. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

Juárez-Montiel, M., Ruiloba, S., Chávez-Camarillo, G., Hernández-Rodríguez, C., & Villa-Tanaca, L. (2011). Huitlacoche (corn smut), caused by the phytopathogenic fungus *Ustilago maydis*, as a functional food. *Revista Iberoamericana de Micología*, 28(2), 69–73. <https://doi.org/10.1016/j.riam.2011.01.001>

Makkar, H. (2003). Effects and Fate of Tannins in Ruminant Animals, Adaptation to Tannins, and Strategies to Overcome Detrimental Effects of Feeding Tannin-Rich Feeds. *Small Ruminant Research*, 49 (3), 241-256. [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-4488\(03\)00142-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-4488(03)00142-1)

Menke, K., & Steingass, H. (1988). Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and *in vitro* gas production using rumen fluid. *Animal Research Development*, 28, 7-55. <https://www.scienceopen.com/document?vid=e1859372-e696-424a-85fb-d305b0b594bc>

Monár-Barragán, P., Lagla-Chimba, G., & López-Tipán, S. (2019). *Ustilago maydis* como posible bioindicador de cultivos saludables de *Zea mays*. *Boletín micológico*, 34(2), 73-80. <https://doi.org/10.22370/bolmicol.2019.34.2.1983>

Montañez, O., Ortega, M., Cobos, M., Larqué, A., & García, J. (2004). Efecto de la alimentación con paja de trigo tratada con *Pleurotus florida* en la flora ruminal de ovinos. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 38 (3), 249-257. <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193017849005.pdf>

Mariaca, R., Pérez, J., León, N., y López, A. (2007). La milpa tsotsil de los Altos de Chiapas y sus recursos genéticos. México: Universidad Intercultural de Chiapas (UNICH) y El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR). <https://searchworks.stanford.edu/view/7826368>

Mariaca, R. (2013). El huerto familiar y su incomparable riqueza. *Ecofronteras*, 47. <https://revistas.ecosur.mx/ecofronteras/index.php/eco/article/view/752>

Mariaca, R., Ruan-Soto, F., & Cano-Contreras, J. (2008). Conocimiento tradicional de *Ustilago maydis* en cuatro grupos mayenses del sureste de México. *Etnobiología*, 6 (1). <https://revistaetnobiologia.mx/index.php/etno/article/view/225>

Mueller-Harvey, I. (2006). Unravelling the conundrum of tannins in animal nutrition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(13), 2010–2037. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2577>

Theodorou, M., Williams, B., Dhanoa, M., McAllan, A., & France, J. (1994). A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 48(3–4), 185–197. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(94\)90171-6](https://doi.org/10.1016/0377-8401(94)90171-6)

Owens, F., Secrist, D., Hill, W., & Gill, D. (1998). Acidosis in cattle: A review. *Journal of Animal Science*, 76(1), 275–286. <https://doi.org/10.2527/1998.761275x>

Patra, A., & Saxena, J. (2011). Exploitation of dietary tannins to improve rumen metabolism. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(1), 24–37. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4152>

Rodríguez-Flores, E., Cifuentes-Blanco, J., Arreguín-Espinosa, R., & Rodríguez-Bustamante, E. (2021). La inclusión del huitlacoche, plaga para algunos y alimento para otros, en la biodiversidad y la soberanía alimentaria de México. En: González Martínez, T.M., & Ávila Akerberg, V. (eds.) *Biodiversidad y soberanías alimentarias en América Latina* (pp. 61-71) ISBN 9781792328626, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca. https://www.researchgate.net/publication/356070127_La_inclusion_del_huitlacoche_plaga_para_algunos_y_alimento_para_otros_en_la_biodiversidad_y_la_soberania_alimentaria_de_Mexico

Stern, M., Varga, G., Clark, J., Firkins, J., Huber, J., & Palmquist, D. (1994). Evaluation of chemical and physical properties of feeds that affect protein metabolism in the rumen. In symposium:

metabolic relationship in supply of nutrients for milk protein synthesis. *Journal of Dairy Science*, 77, p.2762-2786. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7814745/>

Valdez-Morales, M., Barry, K., Fahey, G., Domínguez, J., González, E., Valverde, M., & Paredes-López, O. (2010^a). Effect of maize genotype, developmental stage, and cooking process on the nutraceutical potential of huitlacoche (*Ustilago maydis*). *Food Chemistry*, 119, 689–697. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.07.015>

Valdez-Morales, M., Espinosa-Alonso, L., Espinoza-Torres, L., Delgado-Vargas, F., & Medina-Godoy, S. (2010^b). Phenolic content and antioxidant activity of *Ustilago maydis* strains and their effect on fatty acid composition of pork meat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(16), 9117–9122. [10.1007/s11130-016-0572-3](https://doi.org/10.1007/s11130-016-0572-3)

Valverde, M., Paredes, O., Pataky, J., & Guevara-Lara, F. (1995). Huitlacoche (*Ustilago maydis*) as a food source biology, composition and production. *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 35, 191-229. <https://doi.org/10.1080/10408399509527699>

Van Soest, P. (1994). *Nutritional Ecology of the Ruminant* (2nd ed.). Cornell University Press. <https://www.jstor.org/stable/10.7591/j.ctv5rf668>

Villagrán, Z., Martínez-Reyes, M., Gómez-Rodríguez, H., Ríos-García, U., Montalvo-González, E., Ortiz-Basurto, R., Anaya-Esparza, L., & Pérez-Moreno, J. (2023). Huitlacoche (*Ustilago maydis*), an Iconic Mexican Fungal Resource: Biocultural Importance, Nutritional Content, Bioactive Compounds, and Potential Biotechnological Applications. *Molecules*, 28, (4415). <https://doi.org/10.3390/molecules28114415>

Zhang, J., Zheng, N., Shen, W., Zhao, S., & Wang, J. (2020). Synchrony Degree of Dietary Energy and Nitrogen Release Influences Microbial Community, Fermentation, and Protein Synthesis in a Rumen Simulation System. *Microorganisms*, 8(2), 231. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8020231>

ARTÍCULO EN REVISIÓN