

Fermentación y producción de gas ruminal *in vitro* de diferentes leguminosas forrajeras

Ruminal fermentation and gas production *in vitro* from different forage legumes

Oscar Enrique Del Razo-Rodríguez¹ , Jesús Osorio-Acosta², Edwin Rafael Alvarado-Ramírez^{3,4} , Camelia Alejandra Herrera-Corredor² , Alfonso Longinos Muñoz-Benítez¹ ,
Marco Antonio Rivas-Jacobo^{2*} 

¹Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Agropecuarias, Rancho Universitario, Avenida Universidad Km. 1, CP. 43600. Exhacienda Aquetzalpa, Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México.

²Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Agronomía y Veterinaria, Carretera San Luis - Matehuala km 14.5, CP. 78321. Ejido Palma de la Cruz, Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, México.

³Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería y Ciencias. Centro Universitario Victoria, CP. 87149. Ciudad Victoria, Tamaulipas, México.

⁴Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Carretera Cd. Victoria - Ciudad Mante km 5, CP. 87274. Ejido Santa Librada, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México.

*Autor de correspondencia: marco.rivas@uaslp.mx

Artículo científico

Recibido: 27 de marzo 2024

Aceptado: 15 de octubre 2025

RESUMEN. El objetivo fue evaluar la materia seca (MS, %), materia orgánica (MO, %), proteína cruda (PC, %), volumen fraccional de gas total (V_f , mL g⁻¹MS), volumen máximo de gas total (V_m , mL g⁻¹MS), tasa de producción de gas total (S, h⁻¹) y pH final de la fermentación ruminal *in vitro* del follaje y fruto de *Acacia farnesiana*, *Acacia polyacantha*, *Bauhinia variegata*, *Cassia fistula*, *Delonix regia*, *Erythrina coralloides*, *Jacaranda mimosifolia*, *Leucaena leucocephala*, *Moringa oleifera*, *Pithecellobium dulce* y *Prosopis laevigata*. La especie *J. mimosifolia* presentó los valores más bajos de PC (0.6% y 3.8%) en ambos componentes morfológicos, mientras que *M. oleifera* y *L. leucocephala* obtuvieron los valores más altos (31.2% y 24%) en follaje y fruto, respectivamente. En el gas total, el follaje de *M. oleifera*, *J. mimosifolia* y *C. fistula* obtuvo los valores más altos ($p \leq 0.05$) de V_m y los más bajos ($p \leq 0.05$) de S junto con *B. variegata* y *A. polyacantha*, mientras que en V_f se presentaron variaciones ($p \leq 0.05$) a través del tiempo. En fruto, *A. farnesiana* y *P. laevigata* obtuvieron los valores más altos ($p \leq 0.05$) de V_m , y la S fue mayor en *P. laevigata*, mientras que en V_f hubo diferencias entre especies durante la fermentación. En conclusión, la PC presentó mayor grado de variabilidad tanto para el follaje como para el fruto, y la producción de gas total fue variable entre todas las especies estudiadas y se observó una asociación negativa con el pH. **Palabras clave:** Composición química, especies forrajeras, fermentación *in vitro*, gas ruminal, rumiantes.

ABSTRACT. The objective was to evaluate dry matter (DM, %), organic matter (OM, %), crude protein (PC, %), fractional volume of total gas (V_f , mL g⁻¹MS), maximum volume of total gas (V_m , mL g⁻¹DM), total gas production rate (S, h⁻¹) and final pH of the *in vitro* rumen fermentation of the foliage and fruit of *Acacia farnesiana*, *Acacia polyacantha*, *Bauhinia variegata*, *Cassia fistula*, *Delonix regia*, *Erythrina coralloides*, *Jacaranda mimosifolia*, *Leucaena leucocephala*, *Moringa oleifera*, *Pithecellobium dulce* and *Prosopis laevigata*. The species *J. mimosifolia* presented the lowest CP values (0.6% and 3.8%) in both morphological components, while *M. oleifera* and *L. leucocephala* obtained the highest values (31.2% and 24%) in foliage and fruit, respectively. In the total gas, the foliage of *M. oleifera*, *J. mimosifolia* and *C. fistula* obtained the highest values ($p \leq 0.05$) of V_m and the lowest ($p \leq 0.05$) of S together with *B. variegata* and *A. polyacantha*, while in V_f there were variations ($p \leq 0.05$) over time. In fruit, *A. farnesiana* and *P. laevigata* obtained the highest values ($p \leq 0.05$) of V_m , and S was higher in *P. laevigata*, while in V_f there were differences between species during fermentation. In conclusion, PC presented a greater degree of variability for both foliage and fruit, and total gas production was variable among all the species studied and a negative association with pH was observed.

Keywords: Chemical composition, forage species, *in vitro* fermentation, ruminal gas, ruminants.

Como citar: Del Razo-Rodríguez OE, Osorio-Acosta J, Alvarado-Ramírez ER, Herrera-Corredor CA, Muñoz-Benítez AL, Rivas-Jacobo MA (2025) Fermentación y producción de gas ruminal *in vitro* de diferentes leguminosas forrajeras. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 12(3): e4108. DOI: 10.19136/era.a12n3.4108.

INTRODUCCIÓN

Las prácticas agropecuarias en busca de mayor producción han contribuido al incremento de las emisiones de CO₂ hacia la atmósfera, ocasionando por una parte la degradación y pérdida de carbono en el suelo, el cual se libera, debido a la falta de cobertura vegetal principalmente, en los procesos de erosión, lixiviación y arrastre (FAO 2006). Por lo que se deben buscar estrategias de mitigación de CO₂ en los sistemas ganaderos, mediante el establecimiento de arbustivas forrajeras, como alternativa en la conservación, recuperación y mejoramiento de suelos; así como en la captura de carbono atmosférico y su transformación en carbohidratos en la biomasa aérea. En este sentido, las especies arbustivas y cultivares forrajeras son una opción, como lo mencionan Alecrim *et al.* (2022) que al incorporar leguminosas con adecuado contenido en taninos puede ser una práctica importante para mejorar la cantidad de forraje y la calidad de la dieta animal, además de mitigar los impactos ambientales, como las emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas ganaderos. Aspectos de mejora de rendimientos productivos y calidad de canal en ovinos por uso de taninos se han observado (Orzuna-Orzuna *et al.* 2021). Por lo que el uso de árboles y arbustos representa una alternativa, contribuyendo a mejorar la calidad de la alimentación del ganado a un costo bajo con cantidades bajas de concentrados elaborados a base de granos (Gallego *et al.* 2012, Castro *et al.* 2021). Al respecto Argüello *et al.* (2019) reportan en los países tropicales se puede incentivar el uso de sistemas silvopastoriles, en los que se combinan gramíneas y leguminosas que favorecen los indicadores productivos y reproductivos del ganado. Estos arreglos, con plantas leñosas perennes (árboles y arbustos leguminosas) y gramíneas, proporcionan una mayor oferta forrajeras en distintos estratos, lo que se traduce en una dieta más nutritiva en comparación con los sistemas tradicionales. Es fundamental disponer de alternativas forrajeras para la alimentación bovina, especialmente en el contexto global del cambio climático y sus efectos sobre el medio ambiente, que impactan de forma directa las explotaciones agropecuarias, en particular la ganadería. Contar con materiales vegetales adecuados como opciones forrajeras es una estrategia clave para suplir las necesidades nutricionales del ganado y garantizar la sostenibilidad de la producción. Los sistemas silvopastoriles son una alternativa productiva de gran valor para la alimentación animal, al ofrecer mayor diversidad botánica en comparación con los sistemas tradicionales. Además, contribuyen a la mitigación del cambio climático y pueden traducirse en una reducción de los costos de operación para la ganadería que adopte la diversificación de especies en los sistemas pastoriles (Osorio-Giraldo *et al.* 2024).

Por otro lado, hay diversas técnicas para determinar el valor nutrimental de los forrajes, entre las cuales destaca la técnica *in vitro* de producción de gas (TIVPG), que permite determinar la extensión y la cinética de degradación de los alimentos a través del volumen de gas liberado durante el proceso fermentativo (Theodorou *et al.* 1994). Conforme aumenta la población microbiana, se espera mejor la fermentación y mayor disponibilidad de los componentes solubles (Pell y Schofield 1993). Ante la necesidad de incrementar el conocimiento sobre la oferta y el aprovechamiento de nutrientes en los sistemas de producción, la TIVPG representa una herramienta útil para cuantificar el grado de degradación ruminal de especies vegetales arbustivas y arbóreas, mediante el análisis de la cinética de producción de gas (García-Montes-de-Oca *et al.* 2011).

En leguminosas herbáceas se han realizado estudios para evaluar la relación entre la calidad proteica y la fermentación *in vitro*. Por ejemplo, Rojas *et al.* (2018) observaron que *Phaseolus lunatus* L. var. Silvester (frijolillo), *Centrocema plumiere* Benth (centrocema) y frijolillo-tamarindo presentaron en hojas contenidos de proteína cruda (PC) de 22.1, 18.5 y 16.3%, respectivamente, con volúmenes de gas de 118.9, 160.4 y 115.5 mL g⁻¹ MS; mientras que la vaina se registraron valores de PC de 9.47, 16.15 y 14.4%, y volúmenes máximos de gas de 161.4, 234.8 y 172.3 mL g⁻¹ MS, respectivamente. Estos resultados reflejan diferencias entre especies y órganos, mostrando que los frutos o vainas generan mayor volumen de gas. En el caso de leguminosas arbóreas, la información es aún limitada respecto a su importancia de estas especies en la alimentación del ganado como complemento forrajero en el pastoreo de agostaderos. Al respecto, Guerrero-Rodríguez *et al.* (2021) reportan en la selva baja caducifolia diversas especies leguminosas con valores de PC entre 13.2 y 20.6%, y de fibra detergente ácida de 14.8 a 28.7%, la cual mostró correlacionado negativa con la digestibilidad (48.9 a 83.6%). También Torres-Salado *et al.* (2018) observaron que especies arbóreas como *Guazuma ulmifolia* Lam y *Leucaena* spp. tuvieron un volumen máximo de gas *in vitro* en hojas de 123.2 y 133.3 mL g⁻¹ MS, y vainas de 112.6 y 126.0 mL g⁻¹ MS, respectivamente. Con base en lo anterior, y dada la poca información actualizada sobre el potencial forrajero de las leguminosas arbóreas, el presente estudio planteó como objetivo evaluar la composición química, la fermentación ruminal y la producción de gas *in vitro* del follaje y fruto de *Jacaranda mimosifolia* D. Don, *Moringa oleifera* Lam y nueve especies de leguminosas, empleando la técnica *in vitro* de producción de gas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recolección y preparación de material vegetal

En los meses de julio y agosto se cosecharon en agostaderos, campos, caminos y bordos de carretera follaje y fruto de *Jacaranda mimosifolia* D. Don, *Bauhinia variegata* L., *Prosopis laevigata* Willd., *Leucaena leucocephala* Lam y *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth colectadas en Soledad de Graciano Sánchez, a 22°14' LN, 100°52' LO (GPS Garmin etrex 10). Clima seco templado con 353 mm de precipitación, temperatura media anual de 17 °C y altura de 1 840 msnm. La *Moringa oleifera* Lam. fue colectada en Jala, Nay, a 21°06' LN, 104°26' LO, clima cálido suhúmedo con 860 mm de precipitación, temperatura media anual de 23 °C y altura de 1 070 m. En tanto que *Acacia farnesiana* (L.) Willd. Fue colectada en Cerritos, S.L.P., a 22°36' LN, 99°58' LO, clima seco semicálido con 500 mm de precipitación, temperatura media anual de 19 °C y altura de 1 153 m. Mientras que *Acacia polyacantha* Willd., *Cassia fistula* L., y *Delonix regia* (Hook.) Raf. fueron colectadas en San Ciro de Acosta, S.L.P., a 21°38' LN, 99°49' LO, clima semicálido suhúmedo con 650 mm de precipitación, temperatura media anual de 22.4 °C y altura de 1 860 m. En lo referente a *Erythrina coralloides* DC. fue colectada en Texcoco, Edo. de México a 19°25' LN, 98°53' LO, clima templado semiseco con 686 mm de precipitación, temperatura media anual de 15.9 °C y altura de 2 267 m (García 2004), todas utilizadas como fuentes de forraje (Tabla 1). El material vegetal fue colectado en verde en estado reproductivo en fructificación directamente del árbol. De cada especie se eligieron entre 5 y 10 árboles visiblemente sanos y sin daño físico, de los cuales se obtuvieron muestras de 200 g, tanto de follaje, como de fruto maduro, y se depositaron por separado en bolsas de papel estraza y fueron

rotuladas para su identificación. Todas las muestras se sometieron a un proceso de deshidratación a 55 °C en una estufa de secado de aire forzado durante tres y siete días para el follaje y los frutos, respectivamente. Para luego molerlas en un molino de martillos (Thomas Wiley® Laboratory Mill modelo 4, Swedesboro, EE.UU.) con criba de 1 mm y almacenaron en frascos de vidrio hasta los análisis químicos y la incubación *in vitro*. La identificación taxonómica se realizó por comparación con otros ejemplares colectados por los herbarios Herbarium of Arizona State University (Jacaranda), Herbario MEXU, UNAM (Moringa, Lluvia de oro, Pata de vaca, Mezquite, Guaje y Framboyán), Herbario Nacional, Instituto de Biología, México (Huizache), Herbario de Cheringoma, Mozambique (Espina blanca), Herbario Jerzy Rzendowski, Querétaro, México (Colorín) y Herbario Carlos Contreras Pages, UNAM (Guamúchil).

Tabla 1. Información taxonómica y lugar de recolección de las especies forrajeras evaluadas mediante la técnica *in vitro* de producción de gas para follaje y fruto.

Nombre científico	Nombre común	Familia	Lugar de colecta	Follaje	Fruto
<i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd.	Huizache	Fabaceae	Cerritos, SLP	Si	Si
<i>Acacia polyacantha</i> Willd.	Espina blanca	Fabaceae	San Ciro de Acosta, SLP	Si	No
<i>Bauhinia variegata</i> L.	Pata de vaca	Fabaceae	Soledad de G. S., SLP	Si	Si
<i>Cassia fistula</i> L.	Lluvia de oro	Fabaceae	San Ciro de Acosta, SLP	Si	Si
<i>Delonix regia</i> (Hook.) Raf.	Framboyán	Fabaceae	San Ciro de Acosta, SLP	Si	Si
<i>Erythrina coralloides</i> DC.	Colorín	Fabaceae	Texcoco, Edo. De Méx.	Si	Si
<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	Jacaranda	Bignoniaceae	Soledad de G. S., SLP	Si	Si
<i>Leucaena leucocephala</i> Lam.	Guaje	Fabaceae	Soledad de G. S., SLP	Si	Si
<i>Moringa oleifera</i> Lam.	Moringa	Moringaceae	Jala, Nayarit	Si	Si
<i>Pithecellobium dulce</i> (Roxb.) Benth	Guamuchil	Fabaceae	Soledad de G. S., SLP	Si	Si
<i>Prosopis laevigata</i> Willd.	Mezquite	Fabaceae	Soledad de G. S., SLP	Si	Si

Análisis químicos

Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Nutrición Animal del Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, ubicado en el municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México. El contenido de materia seca (MS), materia orgánica (MO = 1 000 – ceniza) y proteína cruda (PC = contenido de nitrógeno × 6.25) se estimó en el forraje y fruto de todas las especies siguiendo los métodos de la AOAC (1995).

Incubación *in vitro*

Se utilizó un ovino (Suffolk × Rambouillet) de tres años con condición corporal 3 (Russel *et al.* 1969), con cánula ruminal como donador de contenido ruminal, y la extracción se realizó con bomba de vacío y sonda orogástrica a las 08:00 horas, antes de la alimentación. El contenido ruminal extraído se filtró con cuatro capas de gasa para separar las macropartículas de alimento del líquido ruminal, y posteriormente se mezcló con medio nutritivo (agua destilada, solución buffer, macrominerales, microminerales y agente reductor) preparado conforme la metodología de Theodorou *et al.* (1994), en una proporción de 1:9. Esta mezcla se realizó sobre una placa calefactora de cerámica con agitador magnético (Thermo Scientific Cimatec, mod. SP131325, Waltham, Massachusetts, EUA) para mantener la temperatura a 39 °C y la agitación constante. Además, durante la preparación se mantuvo un flujo constante de CO₂ y se añadió 1 mL de solución reductora a base de sulfato de

sodio anhidro e hidróxido de sodio por cada 30 mL de mezcla. La incubación se realizó por triplicado en frascos de vidrio transparente con capacidad de 120 mL, a cada uno se le agregaron 500 mg de follaje o vaina de cada especie y 40 mL de la mezcla obtenida del líquido ruminal y el medio nutritivo. Los frascos se sellaron de forma hermética con tapón de silicón y casquillo de aluminio donde se utilizó una engarzadora manual, y posteriormente se colocaron en baño maría con recirculación (Thermo Scientific, mod. 2864, Marietta, Ohio, EE.UU.) a 39 °C durante 48 horas.

Se utilizaron frascos transparentes para la incubación *in vitro* con el fin de facilitar la observación visual del proceso fermentativo, sin necesidad de interrumpir el sistema ni exponerlo al oxígeno atmosférico. Es importante mencionar que los frascos permanecieron en todo momento en condiciones de oscuridad durante la incubación en baño María, excepto durante los breves momentos en que se realizaron las mediciones, lo cual evitó la exposición directa a la luz y, por lo tanto, no afectó la actividad microbiana ni los resultados de la fermentación. Además, el uso de frascos de vidrio transparente ha sido reportado en estudios previos de fermentación ruminal *in vitro*, incluidos aquellos que utilizan jeringas de vidrio, lo cual respalda la validez metodológica de esta elección.

Medición de la producción de gas y pH

La producción de gas total (PGT) se midió en mililitros a las 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 12, 24 y 48 h de incubación mediante el método de desplazamiento de volumen de agua, que consiste en insertar una aguja en el tapón del frasco y conectarla a una bureta de 100 mL con agua a través de una manguera de látex. Después de cada medición, se liberó el gas acumulado en cada frasco y al finalizar la incubación se registró el pH con un potenciómetro de mesa (Hanna Instruments®, mod. HI-2211, Cluj-Napoca, Transilvania, Rumanía). La medición de la producción de gas se limitó a las 48 h, ya que diversos estudios han demostrado que la mayor proporción de gas se genera durante las primeras 24 a 48 h de fermentación, siendo este el periodo más representativo para evaluar diferencias entre tratamientos.

Cálculos y análisis estadístico

Los valores de la producción de gas se utilizaron para estimar el volumen máximo y tasa de producción de gas total con el procedimiento NLIN de SAS® Ver. 9.3 (SAS 2011), mediante el modelo logístico propuesto por Schofield y Pell (1995):

$$V_f = V_m / (1 - e^{2-4S(t-L)})$$

Donde: V_f = volumen fraccional de gas total (mL g^{-1} MS); V_m = volumen máximo de producción de gas total (mL g^{-1} MS); S = tasa de producción de gas total (h^{-1}) y L = fase de retardo (h).

Los datos de MS, MO y PC fueron promediados y se calculó el coeficiente de variación para cada variable, mientras que la producción fraccional de gas total se analizó bajo un diseño completamente al azar, con medias repetidas en el tiempo y cada frasco se consideró como unidad experimental. En el análisis de V_f , V_m , S y pH se utilizó el procedimiento MIXED de SAS® Ver. 9.3 (SAS 2011) y los modelos estadísticos fueron los siguientes:

$$Y_{ijk} = \mu + E_i + T_j + (ET) + \varepsilon_{ijk} \quad \text{Para la variable de } V_i.$$

$$Y_{jik} = \mu + E_i + \varepsilon_{ijk} \quad \text{Para las variables de pH, } V_m \text{ y } S.$$

Donde: y_{ijk} = variable de respuesta; μ = media general; E_i = efecto fijo de la i -ésima especie (11 especies para follaje y 9 especies para fruto); T_j = efecto fijo del j -ésimo tiempo de incubación (11 tiempos de incubación); ET_{ij} = efecto fijo de la interacción especie $\times$ tiempo de incubación y ε_{ijk} = efecto aleatorio del error experimental. Las medias de cuadrados mínimos se obtuvieron con LSMEANS, la comparación de medias se realizó para variables con efecto significativo del tratamiento utilizando PDIFF y el nivel de significancia fue de $p \leq 0.05$.

RESULTADOS

Contenido de materia seca, materia orgánica y proteína cruda

El coeficiente de variación más alto se obtuvo para el contenido de PC, tanto en follaje como en fruto (Tabla 2). El contenido de MS y MO tuvo rangos de 88.3 a 91.9% y de 87.7 a 95.5% en el follaje, mientras que en el fruto fue de 87.6 a 91.6% y de 94.0 a 97.3%, respectivamente. La especie con menor contenido de PC fue *Jacaranda mimosifolia* (0.6% en follaje y 3.8% en fruto), mientras que la de mayor contenido en follaje fue *Moringa oleifera* (31.2%) y en fruto fue *Leucaena leucocephala* (24%).

Tabla 2. Promedio y coeficiente de variación (CV) del contenido de materia seca (MS), materia orgánica (MO) y proteína cruda (PC), en follaje y fruto de *Jacaranda mimosifolia*, *Moringa oleifera* y nueve especies de leguminosas forrajeras.

Especie	Follaje			Fruto		
	MS (%)	MO (%)	PC (%)	MS (%)	MO (%)	PC (%)
<i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd.	90.4	91.8	15.7	88.1	95.7	20.1
<i>Acacia polyacantha</i> Willd.	90.4	92.7	20.6	-	-	-
<i>Bauhinia variegata</i> L.	89.8	92.1	14.5	91.6	96.9	13.4
<i>Cassia fistula</i> L.	88.3	94.2	16.8	-	-	-
<i>Delonix regia</i> (Hook.) Raf.	89.5	91.0	21.9	89.6	96.4	7.0
<i>Erythrina coralloides</i> DC.	91.3	91.0	17.3	89.2	94.0	16.7
<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	91.2	95.5	0.6	89.9	97.3	3.8
<i>Leucaena leucocephala</i> Lam.	90.8	91.9	14.1	91.2	94.7	24.0
<i>Moringa oleifera</i> Lam.	89.8	87.7	31.2	90.6	94.8	20.6
<i>Pithecellobium dulce</i> (Roxb.) Benth	90.6	92.8	20.0	87.6	94.7	13.6
<i>Prosopis laevigata</i> Willd.	91.9	90.7	16.7	91.5	95.2	10.1
CV (%)	1.05	2.09	40.3	1.52	1.11	43.7

Fermentación ruminal *in vitro* de follaje

La Tabla 3 presenta las medias del volumen máximo (V_m) y la tasa de producción de gas total (S), así como el pH final obtenido de la fermentación *in vitro* del follaje de las especies evaluadas. Con base en las similitudes entre medias de V_m (Tabla 3), se identificaron seis grupos de especies para la fermentación de follaje (Figuras 1A a 1F), y se ordenan de valores menores a mayores de V_m del follaje.

Tabla 3. Volumen máximo de producción de gas total (V_m), tasa de producción de gas total (S) y pH de la fermentación ruminal *in vitro* del follaje de *Jacaranda mimosifolia*, *Moringa oleifera* y nueve especies de leguminosas forrajeras.

Especie	V_m (mL g ⁻¹ MS)	S (h ⁻¹)	pH
<i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd.	125.1 ^{bc}	0.037 ^{ab}	7.04 ^e
<i>Acacia polyacantha</i> Willd.	74.1 ^a	0.028 ^a	7.02 ^{de}
<i>Bauhinia variegata</i> L.	149.0 ^{cd}	0.035 ^{ab}	6.90 ^{bc}
<i>Cassia fistula</i> L.	173.7 ^{def}	0.034 ^{ab}	6.86 ^b
<i>Delonix regia</i> (Hook.) Raf.	123.0 ^{bc}	0.041 ^{bc}	6.99 ^d
<i>Erythrina coralloides</i> DC.	162.8 ^{de}	0.043 ^{bcd}	6.94 ^c
<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	186.7 ^{ef}	0.035 ^{ab}	6.80 ^a
<i>Leucaena leucocephala</i> Lam.	120.5 ^b	0.068 ^e	6.98 ^d
<i>Moringa oleifera</i> Lam.	188.8 ^f	0.029 ^a	7.00 ^d
<i>Pithecellobium dulce</i> (Roxb.) Benth	161.2 ^d	0.053 ^d	6.89 ^b
<i>Prosopis laevigata</i> Willd.	105.8 ^b	0.050 ^{cd}	7.01 ^{de}
EEM	9.2	0.004	0.02

a,b,c,d,e,f Medias con diferente literal en superíndice dentro de columnas son diferentes ($p \leq 0.05$); EEM = error estándar de la media. V_m = volumen máximo de producción de gas total (mL g⁻¹ MS); S = tasa de producción de gas total (h⁻¹).

Grupo 1. *Acacia polyacantha*. Es la especie que presentó menor V_m respecto al resto de las especies ($p \leq 0.05$, Tabla 3) en la fermentación del follaje. La S en esta especie también menor ($p \leq 0.05$), junto con *Moringa oleifera*, *Acacia farnesiana*, *Jacaranda mimosifolia* y *Bauhinia variegata*, y no presentaron diferencias entre sí ($p > 0.05$). El pH final de *A. polyacantha* fue de los más altos, junto con *A. farnesiana* y *Prosopis laevigata*. La Figura 1A presenta el comportamiento de la curva de volumen fraccional de producción de gas total (V_f) de esta especie a través del tiempo, y se observa de las 2 a las 12 h, los valores están entre 2.7 y los 5.2 mL de gas g⁻¹ MS. Posteriormente, hay un incremento que no rebasa los 25 mL a las 48 h.

Grupo 2. *Acacia farnesiana*, *Delonix regia*, *Leucaena leucocephala* y *Prosopis laevigata*. El valor de V_m para las especies de este grupo estuvo en el rango de 105.8 a 125.1 mL g⁻¹ MS, sin diferencias entre medias ($p > 0.05$, Tabla 3). El valor de S fue diferente entre especies ($p \leq 0.05$), mientras que el pH fue similar entre especies ($p > 0.05$), excepto para *A. farnesiana* que mostró el valor más alto ($p \leq 0.05$). En la Figura 1B, se observa un comportamiento similar de V_f de las especies de este grupo en las primeras 12 h de incubación, excepto *L. leucocephala*, la cual mostró un incremento de las 7 a las 9 h, y las diferencias más notables entre especies se observan a las 12 y 48 h ($p \leq 0.05$).

Grupo 3. *Bauhinia variegata*, *Acacia farnesiana* y *Delonix regia*. Los valores de V_m para este grupo estuvieron entre 123.0 y 149.0 mL g⁻¹ MS, sin diferencias entre medias ($p > 0.05$, Tabla 3), y los valores de S tampoco fueron diferentes ($p > 0.05$), pero sí los valores de pH. Este grupo se caracterizó porque las curvas de V_f son similares entre especies en las primeras 12 h de incubación (Figura 1C), pero a las 24 h *B. variegata* mostró un incremento superior a las otras especies ($p \leq 0.05$) y a las 48 h *D. regia* presentó menor V_f que las otras dos especies ($p \leq 0.05$). Por su parte, los valores de S fueron similares entre las especies de este grupo ($p > 0.05$), y el pH final fue diferente ($p \leq 0.05$) entre especies.

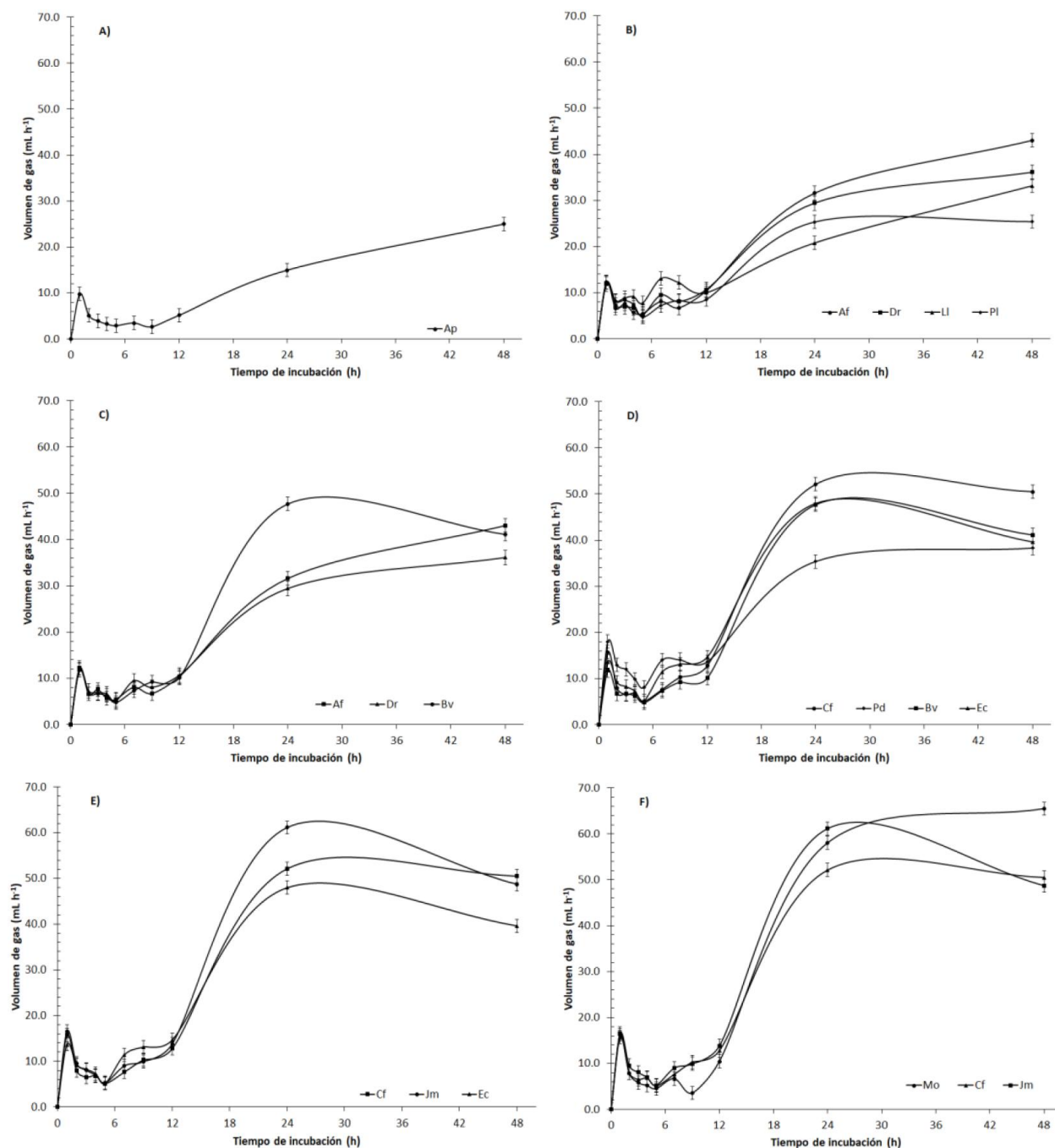


Figura 1. Volumen fraccional de gas total (V_t) registrado durante la fermentación *in vitro* del follaje de *Acacia farnesiana* (Af), *Acacia polyacantha* (Ap), *Bauhinia variegata* (Bv), *Cassia fistula* (Cf), *Delonix regia* (Dr), *Erythrina coralloides* (Ec), *Jacaranda mimosifolia* (Jm), *Leucaena leucocephala* (LI), *Moringa oleifera* (Mo), *Pithecellobium dulce* (Pd) y *Prosopis laevis* (PI).

Grupo 4. *Cassia fistula*, *Erythrina coralloides*, *Pithecellobium dulce* y *Bauhinia variegata*. El valor de V_m para estas especies estuvo en el rango de 149.0 a 173.7 mL g⁻¹ MS, sin diferencias entre medias ($p > 0.05$, Tabla 3). Sin embargo, el valor de S fue diferente entre especies ($p \leq 0.05$) mostrando el valor más bajo para *Cassia fistula*, pero similar para *Pithecellobium dulce* y *Erythrina coralloides* ($p > 0.05$). El pH más bajo se observó con *Cassia fistula* y *Pithecellobium dulce*, sin diferencias entre ellas ($p > 0.05$).

En este grupo se observó un comportamiento de V_f similar entre especies de las 2 a las 5 h de incubación (Figura 1D), excepto para *P. dulce* la cual mostró un incremento de la hora 2 a la 7 ($p \leq 0.05$). Las diferencias más notables entre especies se observaron de las 24 a 48 h, y en el caso de *Cassia fistula* rebasó los 50 mL de gas g^{-1} MS ($p \leq 0.05$).

Grupo 5. *Cassia fistula*, *Jacaranda mimosifolia* y *Erythrina coralloides*. Las especies de este grupo mostraron un valor de V_m entre 162.8 y 186.7 mL g^{-1} MS, sin diferencias entre medias ($p > 0.05$, Tabla 3), y de manera similar, no se observaron diferencias para el valor de S ($p > 0.05$), pero sí para pH ($p \leq 0.05$), siendo menor para *J. mimosifolia*. En la Figura 1E se observa un comportamiento de V_f similar entre especies en las primeras 12 h de incubación ($p > 0.05$), y las diferencias significativas más notables entre especies se observaron a las 24 h ($p \leq 0.05$), tiempo en el que *J. mimosifolia* rebasó los 60 mL g^{-1} MS.

Grupo 6. *Moringa oleifera*, *Jacaranda mimosifolia* y *Cassia fistula*. Este es el grupo de especies con los valores más altos de V_m , sin diferencias entre medias ($p > 0.05$; Tabla 3), las cuales estuvieron entre 173.7 y 188.8 mL g^{-1} MS. Sin embargo, estuvieron entre las especies con los valores más bajos de S, y no difirieron entre ellas ($p > 0.05$). Respecto a su pH, las medias fueron diferentes entre especies ($p \leq 0.05$), siendo *Jacaranda mimosifolia* la de menor valor. En las especies de este grupo (Figura 1F), se observó un comportamiento similar de V_f ($p > 0.05$) en las primeras 7 h de incubación. Las diferencias significativas se observaron a las 24 h, destacando *Jacaranda mimosifolia* con un volumen mayor de gas ($p \leq 0.05$). A las 48 h se observó que *Moringa oleifera* obtuvo el valor más alto de gas rebasando los 65 mL g^{-1} MS.

En la Tabla 4 se presentan las medias de V_m , S y pH final del medio obtenido de la fermentación *in vitro* del fruto de las especies evaluadas. Al igual que en el follaje, en el fruto se obtuvieron cinco grupos con base en las similitudes de las medias de V_m (Tabla 4), y se describen a continuación ordenados de menores a mayores valores de V_m del fruto:

Tabla 4. Volumen máximo de producción de gas total (V_m), tasa de producción de gas total (S) y pH de la fermentación ruminal *in vitro* del fruto de *Jacaranda mimosifolia*, *Moringa oleifera* y nueve especies de leguminosas forrajeras.

Especie	V_m (mL g^{-1} MS)	S (h^{-1})	pH
<i>Acacia farnesiana</i> (L) Willd.	196.02 ^e	0.041 ^{bc}	6.89 ^a
<i>Bauhinia variegata</i> L.	104.75 ^b	0.027 ^a	7.00 ^{cd}
<i>Delonix regia</i> (Hook) Raf.	149.35 ^c	0.032 ^{ab}	6.98 ^{bc}
<i>Erythrina coralloides</i> D.C	147.78 ^c	0.065 ^d	7.04 ^{de}
<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	60.88 ^a	0.038 ^{bc}	7.04 ^{de}
<i>Leucaena leucocephala</i> Lam.	134.66 ^c	0.039 ^{bc}	6.97 ^{bc}
<i>Moringa oleifera</i> Lam	73.72 ^a	0.029 ^a	7.09 ^e
<i>Pithecellobium dulce</i> (Roxb.) Benth	173.67 ^d	0.047 ^c	6.93 ^{ab}
<i>Prosopis laevigata</i> Willd.	190.80 ^{de}	0.078 ^e	6.93 ^{ab}
EEM	7.99	0.003	0.02

^{a,b,c,d,e,f,g} Medias con diferente literal en superíndice dentro de columnas son diferentes ($p \leq 0.05$); EEM = error estándar de la media. V_m = volumen máximo de producción de gas total (mL g^{-1} MS); S = tasa de producción de gas total (h^{-1}).

Grupo A. *Moringa oleifera* y *Jacaranda mimosifolia*. Las especies de este grupo no presentaron diferencias ($p > 0.05$) entre medias para V_m y obtuvieron valores entre 60.88 y 73.72 mL g⁻¹ MS (Tabla 4), y del mismo modo, el pH final no difirió ($p > 0.05$) entre especies y presentaron un promedio de 7.06. En el caso de S, las medias mostraron diferencias ($p \leq 0.05$), siendo *M. oleifera* la de menor valor (0.029 h⁻¹). La Figura 2A muestra el comportamiento de la curva de V_f de estas especies a través del tiempo, y se observó un comportamiento similar ($p > 0.05$) hasta las 24 h, pero a las 48 h *Moringa oleifera* superó ($p \leq 0.05$) a *J. mimosifolia*.

Grupo B. *Bauhinia variegata*. Esta especie tuvo un valor de V_m superior a las especies del Grupo A y menor ($p \leq 0.05$) al del resto de las especies (Tabla 4). Sin embargo, fue una de las especies con menor valor de S, junto con *M. oleifera* y *D. regia* sin diferencias entre medias ($p > 0.05$), mientras que el pH se mantuvo neutro junto con otras especies. La Figura 2B presenta la curva de V_f para *B. variegata*, y se observa un incremento notable de V_f a partir de las 24 h de incubación.

Grupo C. *Delonix regia*, *Erythrina coralloides* y *Leucaena leucocephala*. Las especies de este grupo tuvieron valores de V_m entre 134.66 y 149.35 mL g⁻¹ MS, sin diferencias entre medias ($p > 0.05$; Tabla 4). Sin embargo, *E. coralloides* fue la que mostró mayores valores de S y pH respecto a las otras dos especies ($p \leq 0.05$). En la Figura 2C, se presenta el comportamiento de V_f de estas especies, y se observó que difiere entre las especies de este grupo ($p \leq 0.05$). Destaca *E. coralloides*, la cual obtuvo los valores más altos durante la primera 9 h de incubación, mientras que de las 24 a las 48 h, *D. regia* fue la de mayor valor de V_f ($p \leq 0.05$) con más de 45 mL g⁻¹ MS.

Grupo D. *Prosopis laevigata* y *Pithecellobium dulce*. Los valores de V_m para estas especies estuvieron entre 173.67 y 190.80 mL g⁻¹ MS y no presentaron diferencias ($p > 0.05$) entre medias (Tabla 4), y del mismo modo, el pH final no difirió entre especies y en promedio fue de 6.93. Sin embargo, *P. laevigata* presentó mayor tasa de producción de gas que *P. dulce* ($p \leq 0.05$). En este grupo se observó que el comportamiento de V_f entre especies fue diferente ($p \leq 0.05$) durante las primeras 9 h, y *P. laevigata* obtuvo los valores más altos (Figura 2D). Las diferencias ($p \leq 0.05$) se observaron también a las 24 y 48 h, tiempo en el que *P. dulce* registró el valor más alto.

Grupo E. *Acacia farnesiana* y *Prosopis laevigata*. Las especies de este grupo fueron las de mayor valor de V_m en comparación con el resto de las especies (Figura 2). Algo similar a lo ocurrido con las especies del Grupo D, ocurrió para las del Grupo 5 dado que *A. farnesiana* y *P. laevigata* mostraron valores de V_m y pH final similares ($p > 0.05$) entre sí (Tabla 4), con pH promedio de 6.91. Sin embargo, *P. laevigata* presentó mayor S con respecto a *P. laevigata* ($p \leq 0.05$). Además, las especies de este grupo presentaron un comportamiento de V_f diferente en las primeras 9 h de incubación, donde *P. laevigata* registro los valores más alto ($p \leq 0.05$), pero a las 24 a 48 h fue *A. farnesiana* quien registró los valores más alto en este grupo ($p \leq 0.05$).

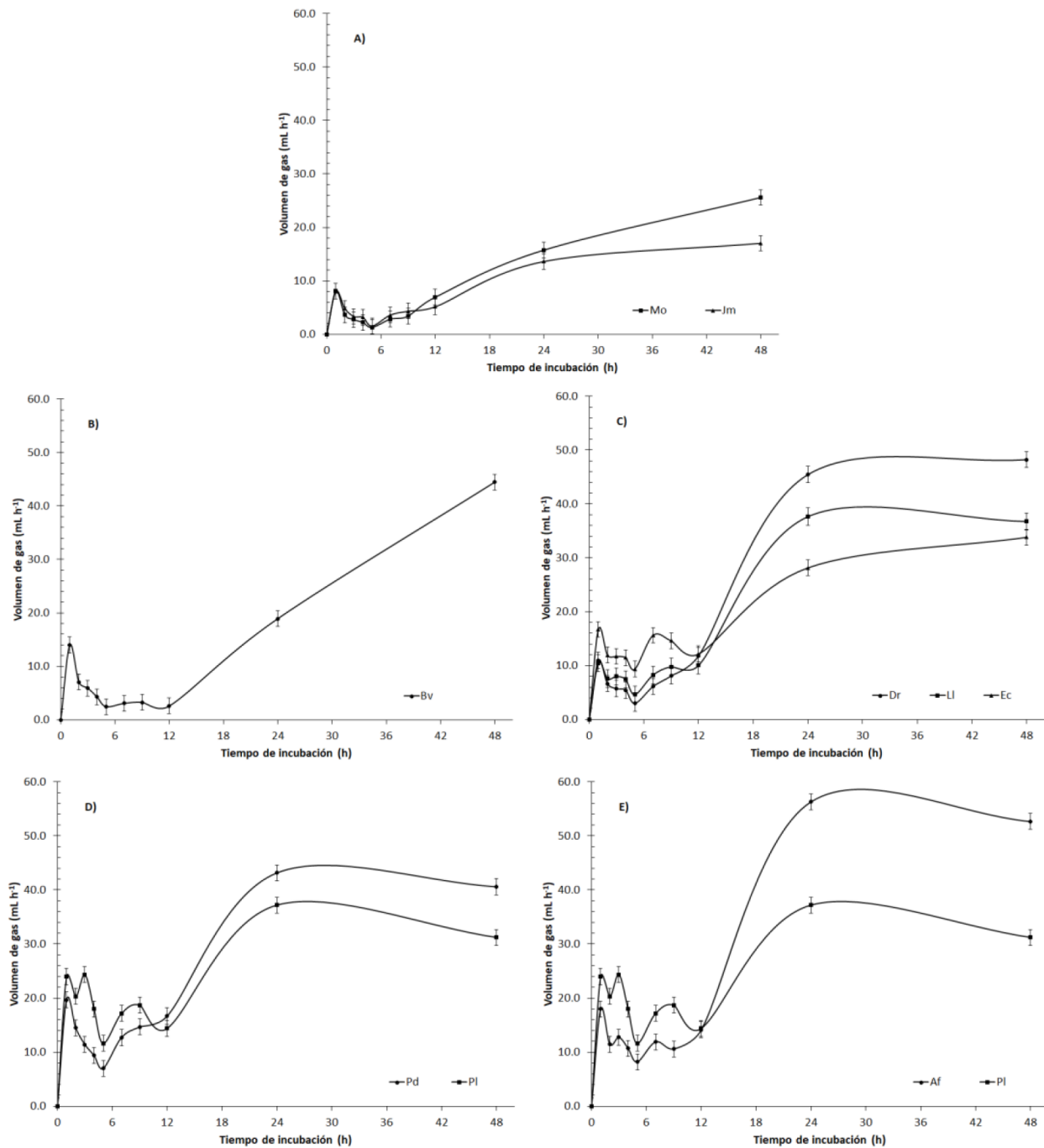


Figura 2. Volumen fraccional de gas total (V_i) registrado durante la fermentación *in vitro* del fruto de *Acacia farnesiana* (Af), *Bauhinia variegata* (Bv), *Delonix regia* (Dr), *Erythrina coralloides* (Ec), *Jacaranda mimosifolia* (Jm), *Leucaena leucocephala* (LI), *Moringa oleifera* (Mo), *Pithecellobium dulce* (Pd) y *Prosopis laevigata* (Pl).

DISCUSIÓN

Contenido de materia seca, materia orgánica y proteína cruda

Los resultados concuerdan con Pinto *et al.* (2002), quienes para especies como *Acacia farnesiana* (L) Willd, *Pithecellobium dulce* Lam y *Leucaena leucocephala* Lam obtuvieron valores de MS de 90 a 93%, de MO de 89 a 92%, y de PC de 18 a 21%. Mientras que Narváez y Lascano (2004) reportan para *Delonix regia* (Hook) Raf. valores de MS, MO y PC de 89.5, 90.3 y 21.2%, respectivamente; en tanto que Rodríguez *et al.* (2014) registraron para *Moringa oleifera* Lam un contenido de MS, MO y PC de 90, 91.8 y 22.2%, respectivamente. Para *Prosopis laevigata* Willd, Montañez-Valdez *et al.* (2021) reportaron valores de MS, MO y PC de 80.5, 89.6 y 13.4%, y Ndlovu y Nherena (1997) para *Jacaranda mimosifolia* D. Don reportan valores de MS, MO y PC de 90.4%, 92.4% y 95 g kg⁻¹ MS, respectivamente. En tanto que Apráez (2014) reportan para *Cassia fistula* L. MS, MO y PC de 89.5, 92.6 y 16%, respectivamente. Estos autores mencionan que, hay variación en los valores de MS, MO y PC, probablemente por el efecto que tienen las estructuras botánicas de las plantas, su estado fenológico, época del año en que se colectan, frecuencia de corte y ambiente en que crecen. Para el contenido de MS, se encontró efecto del estado fenológico de la planta, ya que la mayoría del follaje y fruto fue cosechado en estado de fruto seco y solo para la *Acacia polyacantha* Willd fue cosechada cuando ya había terminado de fructificar. Al respecto, Ojeda *et al.* (2012) reportan diferencias en el contenido de MS en la época de sequía, lo que repercute en la humedad del tejido vegetal y justifica la variación entre especies de plantas evaluadas. También Guerrero-Rodríguez *et al.* (2021) observaron variación para la MS de hojas en arbustos leguminosos del trópico seco conforme la época de recolección.

Sobre el contenido de MS, Velázquez *et al.* (2011) en vainas de *Acacia farnesiana* (L) Willd reportan contenidos de MS, MO y PC de 89.6, 96.2 y 11.5%. Al respecto, para el huizache colectado en Cerritos, S. L. P. se tuvo un alto valor nutricional por su contenido de PC y concentración de aminoácidos esenciales no proteicos (ácido α-acetyldiaminobutírico), motivo por el que su vaina es valorada como recurso alimenticio de bajo costo para rumiantes. Al respecto, Rodríguez *et al.* (2014) reportan para *Moringa oleifera* Lam MS, MO y PC de 88.3, 92.6 y 18.4%, valores que son menores a los obtenidos en el presente estudio. Para *Delonix regia* (Hook) Raf. se reportan contenidos de MS, MO y PC de 90.7, 93.4 y 17.9%, respectivamente (Roa y Muñoz 2012), en tanto que para *Pithecellobium dulce* Lam se reportan contenidos de MS, MO y PC de 88.9, 94.2 y 18.6%, respectivamente (Pinto *et al.* 2002). En otro estudio, Espinoza *et al.* (1996) encontraron para *Leucaena leucocephala* Lam MS, MO y PC de 90.7, 91.8 y 20.37%, respectivamente. Para *Prosopis laevigata* Willd se reportan contenidos de MS de 90.6 y PC de 9.1% (García-López *et al.* 2019). Tanto los pastos como los forrajes son portadores de factores antinutricionales, pero aparecen en mayor concentración en las plantas con altos niveles de nitrógeno como las leguminosas. Los metabolitos como taninos totales, fenoles totales, taninos condensados totales, taninos condensados libres, alcaloides, saponinas, triterpenos, esteroides y flavonoides (Herrera *et al.* 2017), actúan principalmente en la digestión y la absorción de proteínas, pero también tienen influencia sobre la digestión de carbohidratos, utilización de minerales y la disponibilidad de vitaminas.

El uso de árboles y especies leguminosas representa una estrategia eficaz y sostenible para recuperar suelos, mejorar la biodiversidad y fortalecer la adaptación de los ecosistemas ante los

restos de la agricultura sostenible y el cambio climático. Estas especies contribuyen al almacenamiento, la fijación de carbono (C), fijación biológica de nitrógeno y la restauración del suelo mediante relaciones simbióticas con microorganismos edáficos (Domínguez-Núñez 2022). Además, mejoran la calidad del forraje y ofrecen servicios ambientales, económicos y sociales que favorecen la protección y recuperación de los pastizales (Argüello *et al.* 2019).

Fermentación ruminal *in vitro*

La producción de gas total está asociada con la composición química del forraje, y es razonable considerar que, de acuerdo con la estequiometría de la fermentación ruminal, la fermentación de carbohidratos deriva en la producción de ácidos grasos de cadena corta (AGCC; acetato, propionato y butirato), CO_2 y CH_4 , y el pH disminuyen a mayor concentración de AGCC. El gas producido durante la fermentación se genera por dos vías: la síntesis de AGCC y por la reacción de H^+ con el bicarbonato, y la síntesis de acetato y butirato genera CO_2 y H^+ ; mientras que el CH_4 se genera al reaccionar el CO_2 con H^+ (Williams 2000). Además, el volumen de gas producido durante la fermentación está asociado al grado de degradación del sustrato (Fondevila y Barrios 2001), por lo que el valor de V_m de la cinética de producción de gas es un indicador del grado en que se degrada el sustrato, mientras que el valor de S es indicador de la tasa de degradación del sustrato. En ese sentido se puede observar una variabilidad de perfiles de degradabilidad y fermentación de las especies evaluadas, y aunque en la literatura científica no se encontraron resultados sobre la cinética de producción de gas de todas las especies aquí evaluadas, se hacen comparaciones con la información disponible.

Para *follaje*, los resultados de V_m para *Acacia polyacantha* Willd fueron mayores a los reportados por Kaitho *et al.* (1998), quienes observaron 47.0 ($\text{mL g}^{-1} \text{ MO}$). Mientras que Torres-Salado *et al.* (2018) reportaron valores mayores de V_m para *Leucaena leucocephala* Lam. donde se apreció 133.3 ($\text{mL g}^{-1} \text{ MS}$), pero en valores de S fueron menores (0.03 h^{-1}) en follaje de 35 días de edad de rebrote. Mientras que Hernández *et al.* (2010) reportan valores inferiores para *Prosopis laevigata* Willd. de 25.91 ($\text{mL g}^{-1} \text{ MS}$) y datos de S menores a esta investigación (0.033 h^{-1}). Para *Moringa oleifera* Lam. Alexander *et al.* (2008) determinaron valores menores de V_m a los aquí encontrados ($88.3 \text{ mL g}^{-1} \text{ MS}$).

En el caso del *fruto*, en general la variable V mostró diferencias significativas entre las especies estudiadas, para *Acacia farnesiana* (L) Willd y *Prosopis laevigata* Willd. Se tuvieron los mayores valores con 196.02 y 190.80 $\text{mL g}^{-1} \text{ MS}$; los cuales superan a los obtenidos por Hernández *et al.* (2010) quienes reportan valores de 15.24 a 46.30 $\text{mL g}^{-1} \text{ MS}$; pero menores a los de Rojas *et al.* (2018) con 234.8 $\text{mL g}^{-1} \text{ MS}$ en vainas de 30 plantas fisiológicamente maduras. Así mismo, los valores de S de estas especies fueron los más altos junto a *Erythrina coralloides* DC. con $0.065 \text{ (h}^{-1}\text{)}$; pero similares a los de Hernández *et al.* (2010) con valores de $0.066 \text{ (h}^{-1}\text{)}$ y menores a los encontrados por Rojas *et al.* (2018) con 0.0378 a $0.381 \text{ (h}^{-1}\text{)}$.

En general, la reducción del pH por debajo de 6.0, afecta de forma negativa la fermentación ruminal, lo que promueve disminución de la digestión de la MO y de la fibra, cambiando el tipo de AGV producidos (Sánchez-Santillán y Cobos-Peralta 2016). El pH ruminal refuerza el balance entre la capacidad amortiguadora y la acidez de la fermentación. Al disminuir el pH, se estrechan las relaciones acetato-propionato, por consecuencia al incrementarse el pH se amplían las relaciones (Hobson 1972). La composición de la dieta y las prácticas de alimentación influyen sobre

el pH ruminal, ya que a medida que se incrementa la proporción de ingredientes de fermentación rápida disminuye el pH y viceversa (Kaufmann 1976). Aun cuando no puede definirse un pH óptimo en el medio ruminal, los microorganismos presentan cierto intervalo en el cual se reproducen mejor y su metabolismo es más eficiente. Los protozoarios manifiestan su principal desarrollo a pH cercano a 6.5 y son severamente afectados en pH superiores a 8 e inferiores a 5.5, donde este último es uno de los factores que más afecta su población (Hind *et al.* 1973). Al respecto, Cheng *et al.* (1984) concluyeron que, en condiciones ruminales de pH bajo, el ataque bacteriano a las paredes celulares es difícil y por lo tanto se reduce su digestión. Se considera que un pH ruminal superior a 6.2 es el óptimo para obtener una buena digestión de celulosa (Rodríguez y Llamas 1990). La importancia de amortiguar el pH a nivel ruminal tiene la finalidad de mantener el metabolismo de los microorganismos ruminales en un intervalo óptimo para su crecimiento.

CONCLUSIONES

La composición química de las especies estudiadas fue variable, especialmente en la proteína, donde el grado de variabilidad fue mayor, tanto para el follaje como para el fruto. La especie *Jacaranda mimosifolia* de la familia Bignoniaceae fue la que presentó el menor porcentaje de proteína cruda y *Moringa oleifera* de la familia Moringaceae fue la que presentó el mayor valor. En cuanto al gas total, la producción fue variable entre todas las especies estudiadas, y dependió de pH, de tal forma que se observó una asociación negativa entre el pH final de la fermentación *in vitro* de fruto y hoja con la producción de gas total.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Área Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia del Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por las facilidades brindadas para llevar a cabo este estudio.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

Alecrim F, Simón C, Mariotta J, Santander D, Muleta E, Lattanzi F, Rodrigues ABJ, Marchelli JP, Ciganda V (2022) Leguminosas forrajeras con taninos: promisorio potencial de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero en mejoramientos de campo natural. Programa de investigación en producción y sustentabilidad ambiental-INIA. Revista INIA 63: 33-37.

- Alexander G, Singh B, Sahoo A, Bhat TK (2008) *In vitro* screening of plant extracts to enhance the efficiency of utilization of energy and nitrogen in ruminant diets. *Animal Feed Science and Technology* 145(1-4): 229-244.
- AOAC (1995) *Official Methods of Analysis*. 17th Ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, D.C. 1904p.
- Apráez GE, Gálvez CA, Jojoa RC (2014) Valor nutricional y emisión de gases de algunos recursos forrajeros del trópico de altura. *Revista de Ciencias Agrícolas* 31(2): 122-134.
- Argüello-Rangel J, Mahecha-Ledesma L, Angulo-Arizala J (2019) Arbustivas forrajeras: importancia en las ganaderías de trópico bajo Colombiano. *Agronomía Mesoamericana* 30(3): 899-915. <https://doi.org/10.15517/am.v30i3.35136>
- Castro M, Teixeira A, Fernández-Núñez E (2021) The nutritive value of different Mediterranean browse species used as animal feeds under oak silvopastoral systems in Northern Portugal. *Agroforestry Systems* 95: 269-278. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00588-1>
- Cheng KJ, Stewart CS, Dinsdale D, Costerton JW (1984) Electron microscopy of the bacteria involved in the digestion of plant cell walls. *Animal Feed Science and Technology* 10: 93. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(84\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0377-8401(84)90002-6).
- Domínguez-Núñez JA (2022) Leguminosas para la agrosilvicultura tropical sostenible. *In: Avances en leguminosas para una intensificación sostenible*. Meena RS, Kumar S (eds). *Advances in Legumes for Sustainable Intensification*. Academic Press. pp. 483-504. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85797-0.00006-9>
- Espinoza F, Tejos MR, Chacon E, Arriolas L, Argenti P (1996) Producción, valor nutritivo y consumo por ovinos de *Leucaena leucocephala*. *Zootecnia Tropical* 14(2): 215-239.
- FAO (2006) *Guidelines for soil description* (Fourth edition). Publishing Management Service. Rome Italy. 97p.
- Fondevila M, Barrios A (2001) La técnica de producción de gas y su aplicación al estudio del valor nutritivo de los forrajes. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 35(3): 197-207.
- García E (2004) *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Quinta edición. Instituto de Geografía de la UNAM. 90p.
- García-López JC, Durán-García HM, de-Nova JA, Álvarez-Fuentes G, Pinos-Rodríguez JM, Lee-Rangel HA, López-Aguirre S, Ruiz-Tavares D, Rendón-Huerta JA, Vicente-Martínez JG, Salinas-Rodríguez M (2019) Producción y contenido nutrimental de vainas de tres variantes de mezquite (*Prosopis laevigata*) en el Altiplano Potosino, México. *Agrociencia* 53(6): 822-831.
- García-Montes-de-Oca CA, González-Ronquillo M, Salem AZ, Romero-Bernal J, Pedraza JF, Estrada JG (2011) Chemical composition and *in vitro* gas production of some legume browse species in subtropical areas of México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 14(2): 589-595.
- Gallego BEJ, Morales VS, Vivas QNJ (2012) Propuesta para el uso de especies arbóreas y arbustivas forrajeras en sistemas ganaderos en el valle del Patía. Cauca. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 10(2): 207-2016.
- Guerrero-Rodríguez JD, Bustamante-González A, Aceves-Ruiz E, Vargas-López S, Calderón-Sánchez F, Pérez-Ramírez E, Olvera-Hernández JI (2021) Abundancia, producción de materia seca y valor nutricional de leguminosas arbustivas forrajeras del trópico seco. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios Num. Esp. II*: e2881. <https://doi.org/10.19136/era.a8nII.2881>.
- Hernández HJE, Franco GFJ, Camacho RJC, Villarreal EBOA, Pedraza ORM, Plata PFX, Mendoza MGD (2010) Evaluación de vainas y hojas de árboles forrajeros por la técnica de producción de gas *in vitro*. *Zootecnia Tropical* 28(3): 421-426.
- Herrera RS, Verdecia DM, Ramírez JL, García M, Cruz AM (2017) Metabolitos secundarios de *Leucaena leucocephala*. Su relación con algunos elementos del clima, diferentes expresiones de digestibilidad y metabolitos primarios. *Cuban Journal of Agricultural Science* 51(1): 107-116.

- Hind T, Kametaka M, Kandatsu M (1973) The cultivation of rumen oligotrich protozoa. I. Factors influencing the life of Entodinia. *Journal of General Microbiology* 19: 305. <https://doi.org/10.2323/jgam.19.305>
- Hobson PN (1972) Physiological characteristics of rumen microbes in relation to diet and fermentation patterns. *Proceeding of the Nutrition Society* 31: 135. <https://doi.org/10.1079/PNS19720027>
- Kaitho RJ, Nsahlai IV, Williams BA, Umunna NN, Tamminga S, Van Bruchem J (1998) Relationships between preference, rumen degradability, gas production and chemical composition of browses. *Agroforestry systems* 39: 129-144.
- Kaufmann W (1976) Influence of the composition of the ration and the feeding frequency on pH-regulation in the rumen and feed in take in ruminants. *Livestock Production Science* 3: 103-114. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(76\)90028-2](https://doi.org/10.1016/0301-6226(76)90028-2).
- Montañez-Valdez OD, Reyes-Gutiérrez JA, Ley-de Coss A, Vicente-Pérez R, Gómez-Vázquez A, Guerra-Medina CE (2021) Composición química y degradación ruminal de la vaina de mezquite (*Prosopis* spp.) a diferente estado de madurez. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. Núm. Esp. II: e2857. <https://doi.org/10.19136/era.a8nII.2857>.
- Narváez N, Lascano C (2004) Caracterización química de especies arbóreas tropicales con potencial forrajero en Colombia. *Pasturas Tropicales* 26: 1-8.
- Ndlovu LR, Nherera FV (1997) Chemical composition and relationship to *in vitro* gas production of Zimbabwean browsable indigenous tree species. *Animal Feed Science and Technology* 69 (1-3): 121-129.
- Ojeda BW, Sifuentes IE, Rojano AA, Íñiguez CM (2012) Adaptación de la agricultura de riego ante el cambio climático. En: Martínez APF, Patiño GC (eds). *Adaptación al cambio climático: efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México. pp. 65-113.
- Orzuna-Orzuna JF, Dorantes-Iturbide G, Lara-Bueno A, Mendoza-Martínez GD, Miranda-Romero LA, Lee-Rangel HA (2021) Growth performance, meat quality and antioxidant status of sheep supplemented with tannins: a meta-analysis. *Animals* 11: 3184-3209. <https://doi.org/10.3390/ani11113184>.
- Osorio-Giraldo JF, Calderón-Bedoya V, López DMO, Restrepo-Berrio D (2024) Importancia de la disponibilidad de alternativas forrajeras para la alimentación del ganado bovino. *Revista Politécnica* 20(39): 18-30. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v20n39a2>
- Pell AN, Schofield P (1993) Computerized monitoring of gas production to measure forage digestion *in vitro*. *Journal of Dairy Science* 76: 1063-1073.
- Pinto R, Ramírez L, Ku VJC, Ortega L (2002) Especies arbóreas y herbáceas forrajeras del sureste de México. *Pastos y Forrajes* 25: 171.
- Rodríguez R, González N, Alonso J, Domínguez M, Sarduy L (2014) Valor nutritivo de harinas de follaje de cuatro especies arbóreas tropicales para rumiantes. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 48(4): 371-378.
- Rodríguez GF, Llamas LG (1990) Digestibilidad, balance de nutrimentos y patrones de fermentación ruminal. In: Castellanos RA, Llamas LG, Shima SA (eds) *Manual de técnicas de investigación en ruminología. Sistemas de Educación Continua en Producción Animal en México*, A.C. México. pp. 95-126.
- Rojas GAR, Hernández AA, Sánchez-Santillán P, Alaniz GL, Torres SN, Herrera PJ, Escobar EJC (2018) Cinética de fermentación y degradación *in vitro* de tres leguminosas rastreras nativas del municipio de Cuajinicuilapa, Guerrero. *Revistas de Investigaciones Veterinarias del Perú* 29(4): 1229-1236. doi: 10.15381/rivep.v29i4.14340.
- Russel A, Doney J, Gunn R (1969) Subjective assessment of body fat in live sheep. *Journal of Agriculture Science* 72: 451-454.

- Sánchez-Santillán P, Cobos-Peralta MA (2016) Producción *in vitro* de ácidos grasos volátiles de bacterias celulolíticas reactivadas y bacterias ruminales totales en sustratos celulósicos. *Agrociencia* 50(5): 565-574.
- SAS (2011) Base SAS® 9.3. Procedures guide. Statistical Procedures. SAS Institute Inc. Cary, NC. 528p.
- Schofield P, Pell AN (1995) Validity of using accumulated gas pressure readings to measure forage digestion *in vitro*: a comparison involving three forages. *Journal of Dairy Science* 78: 1496-1498. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(95\)76850-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(95)76850-3)
- Theodorou MK, Williams BA, Dhanoa MS, McAllan AB, 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: 185-197.
- Torres-Salado N, Sánchez-Santillán P, Rojas-García AR, Herrera-Pérez J, Hernández-Morales J (2018) Producción de gases efecto invernadero *in vitro* de leguminosas arbóreas del trópico seco mexicano. *Archivos de Zootecnia* 67(257): 55-59. <https://doi.org/10.21071/az.v67i257.3491>
- Velázquez AJ, González RM, Bórquez J, Domínguez IA, Perezgrovas R (2011) Composición química y producción de gas *in vitro* de dietas con vainas de *Acacia farnesiana*. *Archivos de Zootecnia* 60(231): 637-645.
- Williams C (2000) Dietary fatty acids and human health. *Annales de zootechnie* 49(3): 165-180.