



**PRODUCTION AND ESTIMATION OF METHANE EMISSIONS
FROM COWS FED WITH SMALL-GRAIN CEREALS IN THE
CENTRAL HIGHLANDS OF MEXICO †**

**[PRODUCCIÓN Y ESTIMACIÓN DE LA EMISIÓN DE METANO DE
VACAS ALIMENTADAS CON CEREALES DE GRANO PEQUEÑO
EN EL ALTIPLANO CENTRAL DE MÉXICO]**

**Jesús Israel Vega-García¹, Felipe López-González^{1*},
Ernesto Morales-Almaraz² and Carlos Manuel Arriaga-Jordán¹**

¹*Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR). Universidad Autónoma del Estado de México, Campus UAEM El Cerrillo, El Cerrillo Piedras Blancas, 50090 Toluca, Estado de México, México. E-mail:*

flopezg@uaemex.mx

²*Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad Autónoma del Estado de México, Campus UAEM El Cerrillo, El Cerrillo Piedras Blancas, 50090 Toluca, Estado de México, México.*

**Corresponding author*

SUMMARY

Background: Given the demand for meat and milk, it is necessary to increase the productivity of ruminant animals, nevertheless livestock also contributes to climate change due to annual methane (CH₄) emissions, having a detrimental effect on the atmosphere, due to its effect greenhouse and also represents a loss of dietary energy for ruminant animals. **Objective:** The objective was to evaluate the nutritional quality *in vitro*, as well as the production and estimation of methane of small grain cereals in small-scale milk production systems, through two experiments. **Methodology:** In experiment 1, twelve dairy cows were compared through continuous grazing (6 h/d) in a 3x3 Latin square design, replicated three times with three 14-d experimental periods and three small-grain cereals: rye (*Secale cereale*) (CEN), wheat (*Triticum aestivum*) (TRG) and triticale (*Triticosecale* Witt.) (TRT), in addition the cows were supplemented with 4.5 kg DM/cow/d of commercial concentrate. In experiment 2, six cows grazing continuously (8 h/d) on a kikuyu grass (*Cenchrus clandestinus*) pasture were used in a double reversible design with the inclusion of 10 kg DM of rye silage (ECE) or rye silage. triticale (ETR), in addition the cows were supplemented with 3.6 kg DM/cow/d of commercial concentrate; this experiment also had three 14-d experimental periods. Forage (for chemical composition) and milk samples were taken at the end of each experimental period. **Results:** In experiment 1, the nutritional composition presented a high quality (mean of 145 and 740 g/kg DM, for CP and IVDMD, respectively), on the other hand, for experiment 2 the quality was medium-low (mean of 76 and 653 g/kg DM, for CP and IVDMD, respectively) regarding the fermentation parameters obtained through the *in vitro* gas production technique, as well as the methane production of the forages and the estimation of enteric CH₄ production. No significant differences (P>0.05) were detected between the evaluated treatments. **Implications:** The results of this work provide information on the role that small grain cereals can play in methane emissions, in these production systems according to their nutritional value. **Conclusions:** in Experiment 1, it is concluded that rye, wheat and triticale are viable options to obtain medium-quality forage suitable for grazing, presenting enteric methane emissions, as well as moderate emission intensity, similar to those produced by quality pasture grazing. Regarding Experiment 2, both rye silage and triticale silage are presented as options to be used in these milk production systems in winter, without greatly increasing enteric methane emissions.

Key words: emission intensity; grazing; silage; family dairy.

† Submitted July 13, 2023 – Accepted February 12, 2024. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5062>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = J.I. Vega-García - <https://orcid.org/0000-0003-0880-5412>; F. López-Gonzalez - <https://orcid.org/0000-0002-5518-5458>; E. Morales Almaraz - <https://orcid.org/0000-0003-0675-2193>; C.M. Arriaga Jordan - <https://orcid.org/0000-0002-6140-0847>

RESUMEN

Antecedentes: Ante la demanda de carne y leche, se requiere aumentar la productividad de los animales rumiantes, sin embargo, la ganadería también contribuye al cambio climático debido a las emisiones anuales de metano (CH₄) teniendo un efecto perjudicial para la atmósfera, debido a su efecto invernadero y además, representa una pérdida de energía dietética para los animales rumiantes. **Objetivo:** El objetivo fue evaluar la calidad nutricional *in vitro*, además de la producción y estimación de metano de cereales de grano pequeño en sistemas de producción de leche en pequeña escala, mediante dos experimentos. **Metodología:** En el experimento 1 se compararon mediante el pastoreo continuo, (6 h/d) doce vacas lecheras en un diseño de cuadro latino 3x3, replicado tres veces con tres periodos experimentales de 14-d y tres cereales de grano pequeño: centeno (*Secale cereale*) (CEN), trigo (*Triticum aestivum*) (TRG) y triticale (*X Triticosecale* Witt.) (TRT), además las vacas fueron suplementadas con 4.5 kg MS/vaca/d de concentrado comercial. En el experimento 2, se utilizaron seis vacas en pastoreo continuo (8 h/d) de una pradera de pasto kikuyo (*Cenchrus clandestinus*) en un diseño doble reversible con la inclusión de 10 kg de MS de ensilado de centeno (ECE) o ensilado de triticale (ETR), además las vacas fueron suplementadas con 3.6 kg MS/vaca/d de concentrado comercial; este experimento también tuvo tres periodos experimentales de 14-d. Las muestras de forraje (para la composición química) y de leche fueron tomadas al final de cada periodo experimental. **Resultados:** En el experimento 1, la composición nutricional presentó una calidad alta (media de 145 y 740 g/kg MS, para PC y DIVMS, respectivamente), en cambio, para el experimento 2 la calidad fue media-baja (media de 76 y 653 g/kg MS, para PC y DIVMS, respectivamente) en cuanto a los parámetros de fermentación obtenidos mediante la técnica de producción de gas *in vitro*, así como la producción de metano de los forrajes y la estimación de producción de CH₄ entérico, no se detectaron diferencias significativas (P>0.05) entre los tratamientos evaluados. **Implicaciones:** Los resultados de este trabajo proporcionan información de la funcionalidad que pueden tener los cereales de grano pequeño en las emisiones de metano en estos sistemas de producción, de acuerdo a su valor nutritivo. **Conclusiones:** en el Experimento 1, se concluye que el centeno, trigo y triticale, son opciones viables para obtener forraje de calidad media y apto para pastorearse presentando emisiones de metano entérico, así como una intensidad de emisión moderadas, similares a las producidas por el pastoreo de pastos de alta calidad. En cuanto al Experimento 2, tanto el ensilado de centeno y el ensilado de triticale se presentan como opciones para ser utilizadas en estos sistemas de producción de leche en época invernal, sin incrementar mucho las emisiones de metano entérico.

Palabras clave: intensidad de emisión; pastoreo; ensilado; lechería familiar.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Castelán-Ortega *et al.* (2014), ante la demanda de leche y carne, un desafío en México es aumentar la productividad de los rumiantes; aunado a esto, la ganadería es muy importante ya que, mediante el aumento de activos, aumenta la resiliencia de personas de escasos recursos (Blümmel *et al.* 2015). Los sistemas de lecherías familiares en pequeña escala representan el 88.5 % de las unidades de producción en el país (Muciño-Álvarez *et al.* 2021); sin embargo, la ganadería también contribuye al cambio climático ya que las emisiones de metano (CH₄) proveniente de los rumiantes se han elevado considerablemente en el último siglo hasta constituir alrededor del 14.5 % del total de emisiones globales (Meale *et al.* 2012; Carrillo-Hernández *et al.* 2020). Se estima que las emisiones anuales de CH₄ entérico por parte del sector rumiante son de 1.6 a 2.7 Gt de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) lo que representa del 3 al 5 % del total producido en todos los sectores (49 Gt de CO_{2e}) (Aboagye *et al.* 2021).

El CH₄ es producto final de la fermentación ruminal, formado autotróficamente por arqueas metanogénicas a partir de CO₂ y H₂, derivadas de la fermentación de fuentes de carbono, básicamente carbohidratos estructurales y de almacenamiento en las plantas. La distribución al entorno natural del CH₄ tiene un efecto perjudicial para la atmósfera, debido a su efecto invernadero (García-González *et al.* 2008; Castelán-Ortega *et al.* 2014; Liu *et al.* 2018) y aunado a esto, representa una pérdida de energía (contenido bruto de 55.22 MJ kg⁻¹) dietética para los animales rumiantes (2 – 12 %) por lo que representa el principal gas de efecto invernadero en las granjas (Martin *et al.* 2016). De acuerdo con Salas-Riega *et al.* (2022), la actividad agropecuaria es responsable del 12-22 % de gases efecto invernadero y el ganado de leche contribuye con el 40 % de las 8.1 Gt de CO_{2e} al año emitidas por este sector. Se ha mencionado que, desde el aumento del metano en la revolución industrial, la temperatura ha aumentado 0.31 °C y hoy en día el efecto invernadero ocasionado por este gas 25 veces mayor que el del CO₂ (Liu *et al.* 2018).

Ya que el CH₄ tiene efectos importantes sobre el medio ambiente, la industria y con la sociedad, diversos estudios se han enfocado a evaluar alternativas para limitar las emisiones de este gas (García-González *et al.* 2008; Liu *et al.* 2018). De acuerdo con Martin *et al.* (2016), se recomienda disminuir la emisión de CH₄ entérico de los rumiantes sin afectar el desempeño animal como estrategia para reducir las emisiones globales y así mismo, mejorar la eficiencia de conversión de alimentos.

Velarde-Guillén *et al.* (2017) mencionan que es posible reducir las emisiones de metano por kg de leche producido en sistemas lecheros de pequeña escala, con mejores estrategias de alimentación basadas en una mayoría de insumos de buena calidad cultivados en el propio sistema de producción, sin efectos negativos en la producción. De acuerdo con Aboagye *et al.* (2021), se estima que los forrajes de baja calidad tienen efecto en el 75 % de las emisiones globales de CH₄ de los rumiantes. En este tenor, se ha propuesto al pastoreo como posibilidad para disminuir la intensidad de emisión de metano por kg de leche producido (Carrillo-Hernández *et al.* 2020) y de acuerdo con Meale *et al.* (2012), mejorar la calidad del forraje mediante la suplementación de plantas alternativas tiene potencial de disminuir las emisiones de CH₄ por kg de producto animal, dado un mayor aprovechamiento de la dieta y un lapso más corto de alimentación. Sin embargo, el manejo de la alimentación de los pequeños productores es heterogéneo; varía según la localidad, la zona agroecológica y la condición socioeconómica según lo que tengan a su disposición en determinada época del año (Salas-Riega *et al.* 2022); por lo que también se propone el uso de cereales de grano pequeño como opción forrajera en estos sistemas, dadas sus características como ciclo productivo corto y resistencia a la baja precipitación pluvial con un gran rendimiento de materia seca (MS) (Vega-García *et al.* 2021), además de que, como mencionan Eckard *et al.* (2010), al cambiar de pastos C4 a C3 se puede reducir la producción de CH₄.

La emisión de metano entérico se puede medir directa e indirectamente (Salas-Riega *et al.* 2022) y en la actualidad hay poca información sobre la digestibilidad y producción de metano *in vitro* de los cereales de grano pequeño (frescos o en ensilado) como alternativas a la alimentación de vacas en sistemas familiares, por lo tanto, el objetivo de este estudio fue medir la producción de gas y medir la producción *in vitro* de metano en forraje fresco de centeno (*Secale cereale* L.), trigo

(*Triticum* spp.) y triticale (*X Triticosecale* Witt.) y ensilado de centeno y triticale, además de estimar la producción de CH₄ entérico de las vacas alimentadas con este forraje como alternativa alimenticia en sistemas de producción de leche en pequeña escala.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los cultivos de centeno (*Secale cereale* L.), trigo (*Triticum* spp.) y triticale (*X Triticosecale* Witt.) se establecieron en el noroeste del estado de México, en una unidad de producción de leche en pequeña escala (20°10' N, 99° 48' W) y una altitud de 2470 msnm), bajo un enfoque de investigación participativa rural (Conroy, 2005).

La técnica de digestibilidad *in vitro* con producción de gas, así como la cuantificación de gas metano (CH₄) se realizaron en el Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR) de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex). Se llevaron a cabo dos experimentos: en el experimento 1, se hizo una comparación entre centeno, trigo y triticale, alimentos de vacas lecheras en pastoreo. En el experimento 2, se comparó ensilado de centeno y de triticale.

Establecimiento de los cultivos

Como se ha descrito anteriormente en el trabajo de Vega-García *et al.* (2021), se sembró 1 ha de cada cereal: centeno (*Secale cereale*) cv. Nacional; trigo (*Triticum aestivum*) cv. Tollocan-F05; y triticale (*X. Triticosecale* Witt.) cv. Bicentenario. La siembra de los cereales se realizó en mayo del 2020 a una dosis de 140 kg de semilla por ha. La fertilización al momento de la siembra fue de 23–60–40 (kg/ha de N-P-K); después de 19 días se realizó una segunda fertilización con 57 kg N/ha, y se realizó una tercera 44 días post siembra con 23 kg N/ha; la dosis total de fertilización fue de 103–60–40 (kg/ha de N-P-K).

Se llevaron a cabo dos experimentos con estos cultivos. Después de 65 días post siembra, se realizó la primera evaluación de los cultivos, bajo pastoreo continuo (6 h d⁻¹) de vacas lecheras, las cuales recibieron 4.6 kg MS vaca⁻¹ d⁻¹ de concentrado comercial. Esta evaluación tuvo una duración de 42 días divididos en tres periodos experimentales (14 d cada uno), en los que al final de cada periodo se tomaron muestras de cada cultivo, simulando el pastoreo de las vacas (Morales *et al.*, 2018). A las vacas se les midió el rendimiento de leche (kg vaca⁻¹ d⁻¹) en los últimos cuatro días de cada periodo con ayuda de una

balanza de reloj con capacidad para 20 kg, siguiendo los procedimientos de Gómez-Miranda *et al.* (2020).

El segundo experimento comenzó 137 días post siembra (27 días después de terminar la primera evaluación); el rebrote de los cultivos de centeno y triticale se ensiló y se utilizó como suplemento para una segunda evaluación de vacas lecheras bajo pastoreo continuo (Vega-García *et al.*, 2023). El rebrote se ensiló en silos tipo pastel cubiertos por plástico negro calibre 600 como lo describen Vega-García *et al.* (2020) y Sainz-Ramírez *et al.* (2021). Después de 107 días los silos fueron abiertos para ser utilizados como alimento para las vacas (10 kg MS vaca⁻¹ d⁻¹) en un experimento que tuvo una duración de 42 días divididos en tres periodos (14 d cada uno); en este caso las vacas tuvieron acceso a una pradera de pasto kikuyo (*Cenchrus clandestinus*) (8 h d⁻¹) y recibieron 3.5 kg MS vaca⁻¹ d⁻¹ de concentrado comercial. En este experimento se midió también el rendimiento de leche (kg vaca⁻¹ d⁻¹) los últimos cuatro días de cada periodo (Gómez-Miranda *et al.*, 2020). Al final de cada periodo experimental se tomaron muestras de los ensilados y de la pradera de pasto kikuyo a la que tuvieron acceso las vacas. En ambos experimentos también se obtuvieron muestras para los análisis del alimento concentrado que convencionalmente se utiliza para suplementar a las vacas.

Tratamientos y evaluación del forraje

En el experimento 1 se compararon los forrajes de los tres cereales entre sí: CEN= centeno cv. Nacional; TRG= trigo cv. Tollocan-F05 y, TRT= triticale cv. Bicentenario. En el segundo experimento se compararon los ensilados de centeno y triticale: ECE= ensilado de centeno cv. Nacional y, ETR= ensilado de triticale cv. Bicentenario.

Para la técnica de producción de gas *in vitro* se siguió el método descrito por Menke y Steingass, (1988), modificada por Theodorou *et al.* (1994); el cual consiste en la obtención de líquido ruminal para incubarse en frascos de vidrio por 96 h, junto con soluciones amortiguadoras y las muestras, que en conjunto simulan un micro rumen.

Para determinar los parámetros de fermentación ruminal se utilizó el modelo matemático propuesto por Jessop y Herrero (1996):

$$GP = ax (1 - \exp(-ca + t)) + bx (1 - \exp(-cbx(t - lag))) * (t > lag) x - 1$$

Dónde: GP: Producción acumulada de gas (ml); a: producción de gas (ml) a partir de la fermentación de la fracción soluble de los carbohidratos; b: producción potencial de gas (ml) a partir de la fracción insoluble pero potencialmente degradable; ca: tasa de fermentación de la fracción a; cb: tasa de fermentación de la fracción b; y lag: tiempo que transcurre antes de iniciar la fermentación de la FDN. Para la realización de los ajustes de la curva de producción de gas se utilizó el programa Grafit v3.

El gas metano (CH₄) se cuantificó siguiendo la técnica de producción de gas (Theodorou *et al.* 1994); la concentración de CH₄ acumulado en el espacio de cabeza de las botellas se midió a las 24 y 48 h post-incubación con un sensor electroquímico de metano acoplado a un analizador portátil (Aeroqual Serie 500®), siguiendo los procedimientos de Limón-Hernández *et al.* (2019). La calibración del sensor fue realizada por Aeroqual Limited, 109 Valley Road, Mt. Eden, Auckland 1024, Nueva Zelanda.

Así mismo, las emisiones de metano entérico se estimaron a partir del modelo reportado por Niu *et al.* (2018):

$$CH_4 \text{ (g d}^{-1}\text{)} = -60.5 + (12.4 * \text{DMI}) - (8.78 * \%EE) + (2.10 * \%NDF) + (16.1 * \%MF) + (0.148 * \text{LW})$$

Donde DMI: materia seca consumida (kg MS vaca⁻¹ d⁻¹); EE: extracto etéreo de la dieta; NDF: fibra detergente neutra en la dieta; MF: grasa en leche; LW: peso vivo (kg⁻¹ vaca⁻¹).

El factor de corrección para el CH₄ Y_m (proporción de energía bruta perdida como CH₄) se calculó a partir de IPCC (2019):

$$Y_m = 100 * [CH_4 \text{ (MJ d}^{-1}\text{)} / GE \text{ intake (MJ d}^{-1}\text{)}]$$

Donde GE es la energía bruta.

Análisis estadístico

Producción de gas *in vitro*

Se realizó un análisis de varianza con los datos obtenidos en las dos etapas del experimento mediante un diseño completamente al azar, con el siguiente modelo (Vega-García *et al.*, 2022):

$$Y_{ij} = \mu + T_i + e_{ij}$$

Donde μ : media general, T: efecto del tratamiento y, e: variación residual.

Cuantificación de gas metano

Las variables de los forrajes fueron analizadas en un diseño de parcelas divididas (Plata-Reyes *et al.* 2021), utilizando el siguiente modelo:

$$Y_{ijkl} = \mu + T_i + E_j + p_k + T_{p_{ij}} + e_{ijk}$$

Donde μ : media general; T: efecto del tratamiento con forraje o ensilaje de cereal (cereal de grano pequeño) (parcelas principales) $i = 1, 2$ o 3 ; E: efecto del error experimental de las parcelas principales; p: efecto de los períodos experimentales (parcelas divididas) $j = 1, \dots, 3$; T_p : interacción entre tratamientos y períodos experimentales; e: error experimental.

Estimación de metano entérico

En el primer experimento, doce vacas Holstein fueron utilizadas en el experimento en grupos de cuatro vacas cada uno (por cada cuadrado latino), similares en términos de parto, días en leche, producción diaria de leche y peso vivo. El modelo para los análisis estadísticos de variables animales y económicas fue (Burbano-Muñoz *et al.*, 2018):

$$Y_{ijkl} = \mu + S_i + C_{j(i)} + P_k + t_l + e_{ijkl}$$

donde μ : media general; S: efecto debido a los cuadrados; $i=1, 2, 3, 4$; C: efecto debido a vacas en cuadrados $j=1, 2, 3$; P: efecto debido a períodos experimentales; $k=1, 2, 3$; t: efecto debido al tratamiento $l=1, 2, 3$; y, e: término de error residual.

En el segundo experimento se tomaron como unidades experimentales seis vacas Holstein ($n=6$), se agruparon en tríos con variables animales similares en cuanto a producción de leche, peso vivo y etapa de lactancia, y cada grupo se asignó aleatoriamente a un experimento de doble cruzamiento con tres períodos experimentales: las secuencias de tratamiento fueron ECE-ETR-ECE y ETR-ECE-ETR (Muciño-Álvarez *et al.*, 2021). Las variables animales se analizaron con el siguiente modelo:

$$Y_{ijkh} = \mu + S_i + C_{j(i)} + P_{h(j)} + t_k + e_{ijkh}$$

donde μ = la media general, S= efecto debido a la secuencia de tratamiento ($i= 1, 2$), $C_{j(i)}$ = efecto

debido a las vacas dentro de la secuencia de tratamiento ($j = 1, 2, 3$), $P_{h(i)}$ = efecto debido al período experimental dentro de la secuencia de tratamiento ($h = 1, 2, 3$), t_k = efecto debido al tratamiento ($k = 1, 2$), y e_{ijkh} = variación residual.

RESULTADOS

Producción de gas *in vitro*

En la *tabla 1* se pueden apreciar los resultados obtenidos de los parámetros de fermentación en los dos experimentos. En ninguno de estos, las fracciones A (gas producido a partir de carbohidratos rápidamente degradables), B (gas producido a partir de la fracción insoluble), C1 (tasa de gas producido a partir de carbohidratos rápidamente degradables) y C2 (tasa de gas producido a partir de la fracción insoluble), y el tiempo *lag* de fermentación (tiempo (h) antes de que comience la fermentación de la fracción insoluble) resultaron con diferencias significativas ($P>0.05$) entre los tratamientos evaluados. En el experimento 1, el tratamiento CEN, resultó con alrededor de 28 % menos producción de gas para la fracción soluble, en comparación con TRG y TRT, dado su estado más avanzado de maduración, sin embargo, el modelo estadístico no detectó las diferencias como significativas ($P>0.05$). En cuanto al experimento 2 (*Tabla 1*), la fracción soluble del pasto kikuyo resultó 61 % menor a los valores encontrados en los ensilados (ECE y ETR).

Cuantificación de gas metano

El CH_4 producido *in vitro* a las 24 h y 48 h post incubación se muestra en la *Tabla 2* (Experimento 1) y en la *Tabla 3* (Experimento 2). En el experimento 1 se puede apreciar que no se detectaron diferencias ($P>0.05$), para concentración acumulada a las 24 y 48 h entre los tratamientos y entre los períodos; aunque en la concentración acumulada a las 24 h, en la evaluación entre períodos, se puede apreciar una tendencia ($P=0.067$) de menor concentración (23 %) en el primer período.

Para el segundo experimento no se detectaron diferencias ($P>0.05$), para concentración acumulada de CH_4 a las 24 y 48 h entre los tratamientos y entre los períodos (*Tabla 3*).

Tabla 1. Parámetros de fermentación de los cultivos de cereales de grano pequeño y ensilajes en los datos de producción acumulada de gas ajustados al modelo de Jessop y Herrero (1996) en los experimentos 1 y 2.

	A (ml gas-g ⁻¹)	C1 (g h ⁻¹)	B (ml gas-g ⁻¹)	C2 (g h ⁻¹)	lag (h)
Experimento 1					
CON	50.11	0.16	221.36	0.05	4.28
CEN	22.34	0.55	217.90	0.03	3.96
TRG	31.72	0.47	205.01	0.03	3.53
TRT	30.78	0.30	234.91	0.03	3.82
EEM	6.263	0.195	23.916	0.006	0.467
<i>P</i> -value	0.286	0.308	0.445	0.934	0.890
Experimento 2					
KIK	26.02	0.16	195.31	0.04	5.67
CON	42.2	0.23	189.09	0.04	6.36
ECE	40.60	0.18	158.69	0.03	4.46
ETR	44.63	0.16	155.54	0.03	4.96
EEM	6.131	0.063	10.001	0.002	0.854
<i>P</i> -value	0.629	0.774	0.739	0.455	0.574

CEN= cultivo de centeno; TRG: cultivo de trigo; TRT: cultivo de triticale; EEM: error estándar de la media; CON: concentrado comercial; ECE: ensilaje de centeno; ETR: ensilaje de triticale; KIK: pasto kikuyo; A: gas producido a partir de carbohidratos rápidamente degradables; C1: tasa de gas producido a partir de carbohidratos rápidamente degradables; B: gas producido a partir de la fracción insoluble; C2: tasa de gas producido a partir de la fracción insoluble; lag: Tiempo (h) antes de que comience la fermentación de la fracción insoluble.

Estimación de metano entérico

En la Tabla 4 se observan los resultados de la estimación de emisiones de CH₄ entérico de vacas lecheras alimentadas mediante pastoreo de cereales de grano pequeño en el experimento 1. No se detectaron diferencias estadísticamente significativas ($P>0.05$) entre tratamientos y entre periodos.

Durante el experimento 2, no se detectaron diferencias ($P>0.05$) entre tratamientos, aunque en este caso, sí se tuvieron mayores ($P<0.05$) emisiones de metano por vaca en el periodo 1 (320.8 g/vaca/d) y, por kg de leche en el periodo 3 (26.2 g/kg leche) (Tabla 5).

DISCUSIÓN

Producción de gas *in vitro*

De acuerdo con Geatchew *et al.* (1998) la cinética de producción de gas depende de las proporciones de partículas solubles, insolubles pero degradables e indegradables del alimento. Celis-Álvarez *et al.* (2017), evaluaron en el altiplano central mexicano la producción de gas, encontrando valores para la fracción A de 40.8, 60.2, 31.7 y 28.3 ml/g, para cereales de centeno, triticale, avena negra (*Avena strigosa*) y avena común (*Avena sativa*),

respectivamente; si bien los valores de avena se asemejan, los valores de centeno y triticale resultan mayores a lo que se reporta para CEN y TRT, lo que indica un muestreo en mejor etapa nutritiva para el trabajo de Celis-Álvarez *et al.* (2017), esto se relaciona con un 14 y 11 % más contenido de FDN en las plantas de centeno y triticale, respectivamente. Martínez-Loperena *et al.* (2011) indican que mayores contenidos de FDN se corresponden con una disminución en la disponibilidad de la fracción A. Cabe señalar que los resultados en TRT sí resultaron similares a lo reportado por Celis-Álvarez *et al.* (2017), en cuanto a la fracción B (234 ml/g), y el tiempo lag (3.9 h), en cambio CEN mostró una menor producción de gas para esta fracción con un mayor tiempo lag.

Kafilzadeh y Heidary (2013), quienes midieron por medio de la técnica de producción de gas la cinética de fermentación de 18 variedades de avena en Irán, tuvieron una media en cuanto a la producción total de gas, de 302.5 ml/g, lo que significa un forraje más digestible en comparación con los tres cereales evaluados en este trabajo; cabe señalar que Kafilzadeh y Heidary (2013), evaluaron avena cuando esta se encontraba en estado lechoso masoso (GS 83, de acuerdo a la escala Zadoks para la evaluación de etapas de crecimiento de los cereales). En cuanto a la fracción lentamente fermentable, los resultados reportados fueron

mayores a lo encontrado por Vega-García *et al.* (2021) en evaluaciones con rebrote avena negra (*Avena strigosa*) en pastoreo (200 ml gas/g) en los tratamientos de CEN y TRT, ya que en este caso

eran los tratamientos con forrajes más maduros; los valores de TRG resultaron similares (205 ml gas/g).

Tabla 2. Producción de metano acumulado *in vitro* de forrajes de cereales de grano pequeño en el experimento 1.

Variable	Periodos			Media	EEMt	EEMp	P-t	P-p
	1	2	3					
CH₄ 24 h (mmol/g MS)								
CEN	0.292	0.384	0.371	0.349	0.020	0.088	0.836	0.067
TRG	0.292	0.373	0.370	0.345				
TRT	0.286	0.352	0.350	0.330				
Media	0.290	0.370	0.364					
Interacción-EEMt*p				0.007 ^{NS}				
Concentrado	0.360	0.380	0.347	0.362				
CH₄ 48 h (mmol/g MS)								
CEN	0.761	0.821	0.780	0.787	0.089	0.131	0.339	0.117
TRG	0.666	0.813	0.879	0.786				
TRT	0.642	0.689	0.799	0.710				
Media	0.690	0.774	0.819					
Interacción-EEMt*p				0.065 ^{NS}				
Concentrate	0.785	0.675	0.741	0.734				

CEN= cultivo de centeno; TRG: cultivo de trigo; TRT: cultivo de triticale; EEMt: error estándar de la media para los tratamientos; EEMp: error estándar de la media para los periodos; P-t: valor P para los tratamientos; P-p: valor P para los periodos; NS: no significativo ($P>0,05$).

Tabla 3. Producción de metano acumulado *in vitro* de ensilajes de cereales de grano pequeño en el experimento 2.

Variable	Periodos			Media	EEMt	EEMp	P-t	P-p
	1	2	3					
CH₄ 24 h (mmol/g MS)								
ECE	0.211	0.211	0.193	0.205	0.039	0.028	0.445	0.607
ETR	0.247	0.236	0.199	0.227				
Media	0.229	0.223	0.196					
Interacción-EEMtx*p				0.015 ^{NS}				
Pradera	0.173	0.105	0.337	0.205				
Concentrado	0.339	0.278	0.308	0.308				
CH₄ 48 h (mmol/g MS)								
ECE	0.626	0.471	0.490	0.529	0.091	0.142	0.452	0.178
ETR	0.686	0.537	0.524	0.582				
Media	0.656	0.504	0.507					
Interacción-EEMtx*p				0.016 ^{NS}				
Pradera	0.498	0.523	0.634	0.551				
Concentrado	0.742	0.610	0.808	0.720				

ECE= ensilaje de centeno; ETR: ensilaje de triticale; EEMt: error estándar de la media para los tratamientos; EEMp: error estándar de la media para los periodos; P-t: valor P para los tratamientos; P-p: Valor P para los periodos; NS: no significativo ($P>0,05$).

Tabla 4. Consumo de materia seca (kg MS/vaca/d) y emisiones de metano entérico estimadas en el experimento 1.

	Tratamiento			EEMt	P-Value	Periodos			EEMp	P-Value
	CEN	TRG	TRT			1	2	3		
CMS	14.4	14.7	14.8	0.411	0.707	14.6	15.3	14.1	0.341	0.068
g/vaca/d	319.5	329.1	322.5	6.545	0.578	324.6	334.0	312.6	6.545	0.093
g/kg/CMS	22.5	22.4	21.9	0.245	0.223	22.4	21.9	22.5	0.245	0.218
g/kg/leche	20.5	20.8	20.9	0.383	0.713	21.2	20.7	20.3	0.383	0.245
g/kg/LCE	19.2	20.0	19.9	0.324	0.246	20.0	19.5	19.5	0.324	0.415
Ym (% IBE)	6.6	6.6	6.4	0.071	0.223	6.5	6.4	6.6	0.071	0.218

CEN: centeno pastoreado; TRG: trigo pastoreado; TRT: triticale pastoreado; DMI: consumo de materia seca; LCE: leche con corrección energética; Ym: factor de corrección para el metano; IBE: ingesta bruta de energía; EEMt: error estándar de la media para los tratamientos; EEMp: error estándar de la media para los periodos.

Tabla 5. Consumo de materia seca (kg MS/vaca/d) y emisiones de metano entérico estimadas en el experimento 2.

	Tratamiento		EEMt	P-value	Periodos			EEMp	P-value
	ECE	ETR			1	2	3		
CMS	12.9	12.7	0.215	0.543	13.4 ^a	12.6 ^b	12.6 ^b	0.703	0.019
g/vaca/d	307.8	309.7	5.006	0.781	320.8 ^a	300.5 ^b	305.0 ^b	5.006	0.043
g/kg/CMS	24.1	23.8	0.272	0.661	23.8	23.8	24.2	0.272	0.551
g/kg/leche	24.3	24.2	0.655	0.495	23.3	23.2	26.2	0.655	0.016
g/kg/LCE	31.6	32.1	0.460	0.791	32.7	31.1	31.7	0.460	0.102
Ym (%IBE)	7.0	7.0	0.079	0.661	7.0	7.0	7.1	0.079	0.551

ECE: ensilaje de centeno; ETR: ensilaje de triticale; CMS: consumo de materia seca; LCE: leche energética corregida; Ym: factor de corrección para el metano; IBE: ingesta bruta de energía; EEMt: error estándar de la media para los tratamientos; EEMp: error estándar de la media para los periodos; ^{a-b} Valores con literales distintas entre columnas indican diferencias significativas.

Para el experimento 2, ambos ensilados resultaron similares ($P>0.05$) en las dos fracciones de carbohidratos y, por lo tanto, lo mismo pasó en las tasas de fermentación y en el tiempo *lag*. Kilic (2010) evaluó heno y ensilado de trigo (*Triticum* spp.) cosechado en estado masoso bajo esta misma técnica, encontrando menores valores en comparación a ECE y ETR, para las fracciones A (media de 6.4 ml) y B (media de 61 ml); por lo que los ensilados evaluados en este trabajo representarían unos forrajes de mayor calidad, los ensilados evaluados en este trabajo. En cuanto a KIK, el valor de la fracción B (195.31 ml gas/g), se reporta mayor que la mayoría de pastos tropicales (media de 121.6 ml gas/g) usados en sistemas de producción de ganado de doble propósito por Juárez-Reyes *et al.* (2009), quienes también midieron la producción de gas, aunque en pastos más fibrosos.

Cuantificación de gas metano

Aboagye *et al.* (2021), hicieron una evaluación del cálculo de emisión potencial de CH₄ en cereales de

grano pequeño (avena, cebada, trigo y triticale), usando como sustrato la planta completa (entre 80 y 90 días post siembra), en estados de masa blanda a leche media y dando resultados de 0.546 a 0.672 mmol/g, lo que se relaciona a los valores encontrados en los experimentos 1 y 2, cerca de las 48 h post incubación.

Niu *et al.* (2020) reportaron valores en la producción de CH₄ entre 21.0 y 22.1 % para ensilado de trigo, lo que resulta similar a los 0.205 y 0.227 mmol/g MS de metano, resultado de la fermentación con ensilado de centeno y triticale, respectivamente; Mejía-Urbe *et al.* (2021), midieron la producción de CH₄ en ensilado de maíz, obteniendo resultados 16 % mayores (0.346 mmol/g) a los que se obtuvieron con cereales de grano pequeño en este estudio.

De acuerdo con Niu *et al.* (2020), un alto contenido de almidón en la dieta tiene un efecto en la reducción de metano entérico y puede reducir también la pérdida de energía del alimento, ya que como mencionan Evans (2018) y Aboagye *et al.*

(2021), el almidón favorece la producción de microorganismos amiloíticos que aumentan el propionato y capturando hidrógeno en el proceso fermentativo; este aspecto se puede ver reflejado en la menor producción de metano *in vitro* acumulado en los ensilados de cereales de grano pequeño (Tabla 4), en comparación con los valores reportados de los cereales en pastoreo (Tabla 3), aunque para llegar a una mejor conclusión, se deberían hacer estudios sobre la población microbiana del rumen.

Estimación de metano entérico

Durante este trabajo se reporta una media de emisiones de CH₄, de 22.2 g/kg CMS en el experimento 1 y de 23.9 g/kg CMS en el experimento 2. De acuerdo con Eckard *et al.* (2010), se han informado variaciones en la emisión de metano en diferentes animales por unidad de consumo de alimento; con hasta 302 vacas lecheras Friesian x Jersey en pastoreo durante cuatro semanas (Clark *et al.* 2005), se reportó un promedio de 19.3 g/kg CMS (332.1 g CH₄/d), lo que resulta 13.3 % menor a los valores del experimento 1 y 19.3 % menor a los valores del experimento 2.

Castelán-Ortega *et al.* (2014), realizaron un estudio de simulación para estimar las emisiones de metano en México en ambiente tropical y templado, dando una estimación de 283 g CH₄/vaca/d en esta última región, tomando en cuenta una vaca promedio de 400 kg de peso y con un rendimiento de 14.4 kg leche/d, además de contemplar una dieta que consistió en 30 % concentrado y 70 % de forraje (comprendido por especies forrajeras extendidas en la región templada del país: *Cenchrus clandestinus*, *Sporobolus indicus*, *Eleocharis dombeyana* y *Trifolium amabile*); el valor de CH₄ resultó 12 y 8 % menor a lo que se reporta en este trabajo en los experimentos 1 y 2, respectivamente, con una relación similar de concentrado/forraje (medias de 30.6/69.4 y 28.5/71.5 para los experimentos 1 y 2, respectivamente) (Vega-García *et al.* 2021; Vega-García *et al.* 2023); sin embargo, se debe tener en cuenta que el consumo de MS en los experimentos es 11 y 22 % mayor a lo reportado por Castelán-Ortega *et al.* (2014).

La media de emisiones reportadas en este experimento (323.7 g/vaca/d), resulta similar a los parámetros que Velarde-Guillén *et al.* (2017) prevén para sistemas lecheros en pequeña escala con estrategias de alimentaciones tradicionales (324 g/vaca/d) y menores a las estrategias de alimentación óptimas (335 g/vaca/d). De acuerdo

Hristov *et al.* (2013), un mayor consumo de alimentos altamente digeribles reduce la cantidad de CH₄ generado; en este caso la media de emisión fue de 22.2 g/kg CMS, lo que se correlaciona con lo que se ha mencionado en estos sistemas con forraje a base de pastos anuales o perennes (Carrillo-Hernández *et al.* 2020).

En ambos experimentos, las emisiones medias estimadas de metano, se encuentran dentro de los parámetros (77-447 g CH₄ vaca/d) mencionados por Ellis *et al.* (2007).

De acuerdo con Castelán-Ortega *et al.* (2014), contenidos altos de FDN tienen una correlación positiva con la producción de CH₄ en el ganado lechero; se ha demostrado que la producción de metano por unidad de celulosa digerida es tres veces mayor a la de hemicelulosa, y, por otra parte, la celulosa y hemicelulosa fermentan más lentamente que los carbohidratos no estructurales (se produce más CH₄ por unidad de sustrato digerida). Mejorar la calidad del forraje también tiende a aumentar el consumo voluntario y a reducir el tiempo de retención en el rumen, promoviendo una digestión post-ruminal energéticamente más eficiente y reduciendo la proporción de energía dietética convertida en CH₄ (Eckard *et al.* 2010).

Para disminuir las emisiones de CH₄ y al mismo tiempo mejorar la rentabilidad del sistema de producción, se han propuesto medidas alternativas en la manipulación animal como lactancias extendidas (partos cada 18 meses), minimizar el número de animales improductivos y mejorar la eficiencia en la conversión alimenticia mediante el mejoramiento genético y engorde más temprano del ganado vacuno (Eckard *et al.* 2010).

CONCLUSIONES

Al no presentarse diferencias significativas en ninguno de los dos experimentos, se concluye que el centeno (CEN), trigo (TRG) y triticale (TRT), son opciones viables para obtener forraje de calidad media y apto para pastorearse presentando emisiones de metano entérico, así como una intensidad de emisión moderadas, similares a las producidas por el pastoreo de pastos de calidad (Experimento 1). En cuanto al Experimento 2, tanto el ensilado de centeno (ECE) y el ensilado de triticale (ETR) representan opciones para ser utilizadas en estos sistemas de producción de leche en época invernal, sin incrementar mucho las emisiones de metano entérico.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the farmer who participated in the experiments and to his family, whose privacy is respected by not mentioning their names. Thanks, are also due to Mrs. María de Lourdes Maya Salazar and Mrs. Laura Edith Martínez Contreras for their support in the laboratory analyses.

Funding. This work was carried out thanks to funding from the Universidad Autónoma del Estado de México through project UAEM 6467/2022CIB, and the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for the scholarship awarded to Jesús Israel Vega-García for his doctoral studies.

Conflicts of interest. The authors confirm that there are no known conflicts of interest associated with these publications.

Compliance with ethical standards. Original data derived from the authors' work are presented. The work was carried out under the ethical procedures established by the Autonomous University of the State of Mexico. Informed consent to participate was obtained from farmers.

Data availability. Data are available from the correspondent upon reasonable request.

Author contribution statement (CRediT). **Jesús Israel Vega-García**, writing original, draft and methodology, writing-review and editing. **Felipe López-González**, conceptualization, writing-review and editing, methodology, validation, and data curation. **C.M. Arriaga-Jordán**, conceptualization, writing-review and editing, supervision and validation, acquisition of financial resources. **E. Morales-Almaraz**, writing-review and editing.

REFERENCES

- Aboagye, I.A., Rosser, C.L., Baron, V.S. and Beauchemin, K.A. 2021. *In vitro* assessment of enteric methane emission potential of whole-plant barley, oat, triticale and wheat. *Animals*, 11 P. 450. [HTTP://doi.org/10.3390/ani11020450](http://doi.org/10.3390/ani11020450)
- Blümmel, M., Haileslassie, A., Herrero, M., Beveridge, M., Phillips, M. and Havlik, P. 2015. Feed resources vis-à-vis livestock and fish productivity in a changing climate. In: *Livestock Production and Climate Change*. CAB International.
- Burbano-Muñoz, V.A., López-González, F., Estrada-Flores, J.G., Sainz-Sánchez, P.A. and Arriaga-Jordán, C.M., 2018. Oat silage for grazing dairy cows in small scale dairy systems in the highlands of central Mexico. *African Journal of Range and Forage Science*, 35, pp. 63-70. <http://doi.org/10.2989/10220119.2018.1473493>
- Carrillo-Hernández, S., López-González, F., Estrada-Flores, J.G. and Arriaga-Jordán, C.M., 2020. Milk production and estimated enteric methane emission from cows grazing ryegrass pastures in small-scale dairy systems in Mexico. *Tropical Animal Health and Production*, 52, pp. 3609-3619. <http://doi.org/10.1007/s11250-020-02398-0>
- Castelán-Ortega, O.A., Ku-Vera, J.C. and Estrada-Flores, J.G. 2014. Modeling methane emissions and methane inventories for cattle productions systems in Mexico. *Atmósfera*, 27, pp. 185-191.
- Celis-Alvarez, M.D., López-González, F., Estrada-Flores, J.G., Domínguez-Vara, I.A., Heredia-Nava, D., Munguía-Contreras, A. and Arriaga-Jordán, C.M. 2017. Evaluación nutricional *in vitro* de forrajes de cereales de grano pequeño para sistemas de producción de leche en pequeña escala. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20, pp. 439-446. <http://doi.org/10.56369/tsaes.2400>
- Conroy, C., 2005. *Participatory livestock research*, (ITDG Publishing, Bourton on Dunsmore, Warwickshire, UK.).
- Clark, H., Pinares-Patiño, C.S. and de Klein, C.A.M., 2005. Methane and nitrous oxide emissions from grazed grasslands. In: McGilloway, D.A. (Ed.), *Grassland: A Global Resource*. Wageningen Academic, Wageningen, The Netherlands, pp. 279–293.
- Eckard, R.J., Grainger, C. and de Klein, C.A.M., 2010. Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production: A review. *Livestock Science*, 130, pp. 47-56. <http://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.02.010>
- Ellis J.L., Kebreab E., Odongo N.E., McBride B.W., Okine E.K. and France J., 2007.

- Prediction of methane production from dairy and beef cattle. *Journal of Dairy Science*, 90, pp. 3456–3467. <http://doi.org/10.3168/jds.2006-675>
- Evans, B. 2018. The role ensiled forage has on methane production in the rumen. *Animal Husbandry, Dairy and Veterinary Science*, 2, pp. 1-4. <http://doi.org/10.15761/AHDVS.1000143>
- García-González, R., López, S., Fernández, M., Bodas, R. and González, J.S., 2008. Screening the activity of plants and spices for decreasing ruminal methane production *in vitro*. *Animal Feed Science and Technology*, 147: 36-52. <http://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.09.008>
- Geatchew, G., Blummel, M., Makkar, H.P.S. and Becker, K., 1998. *In vitro* gas measuring techniques for assessment of nutritional quality of feeds: a review. *Animal Feed Science and Technology*, 72, pp. 261-281. [http://doi.org/10.1016/S0377-8401\(97\)00189-2](http://doi.org/10.1016/S0377-8401(97)00189-2)
- Gómez-Miranda, A., Estrada-Flores, J.G., Morales-Almaraz, E., López-González, F., Flores-Calvete, G. and Arriaga-Jordán, C.M., 2020. Barley or black oat silages in feeding strategies for small-scale dairy systems in the highlands of Mexico. *Canadian Journal of Animal Science*, 100, pp. 221-227. <http://doi.org/10.1139/cjas-2018-0237>
- Hristov, A.N., Oh, J., Firkins, L., Dijkstra, J., Kebreab, E., Waghorn, G., Makkar, H.P.S., Adesogan, T., Yang, W., Lee, C., Gerber, P.J., Henderson, B. and Tricarico, J.M., 2013. Special Topics. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *Journal of Animal Science*, 91, pp. 5045–5069. <https://doi.org/10.2527/jas2013-6583>
- IPCC, 2019. Emissions from livestock and manure management. In: *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (ed) 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- Jessop, N.S. and Herrero M., 1996. Influence of soluble components on parameter estimation using the *in vitro* gas production technique. *Animal Science*, 62, pp. 626–627. <http://doi.org/10.1017/S1752756200592278>
- Juárez-Reyes, A.S., Cerrillo-Soto, M.A., Gutiérrez-Ornelas, E., Romero-Treviño, E.M., Colín-Negrete J. and BernalBarragán, H., 2009. Assessment of the nutritional value of tropical grasses obtained from conventional analyses and *in vitro* gas production. *Técnica Pecuaria de México*, 47, pp. 55-67.
- Kafilzadeh, F. and Heidary, N., 2013. Chemical composition, *in vitro* digestibility and kinetics of fermentation of whole-crop forage from 18 different varieties of oat (*Avena sativa* L.). *Journal of Applied of Animal Research*, 41, pp. 61-68. <http://doi.org/10.1080/09712119.2012.739084>
- Kilic, U., 2010. Nutritive values of whole-crop wheat hay and silage and effect of microbial inoculants on *in vitro* gas production. *Journal of Applied Animal Research*, 37, pp. 67-71. <https://doi.org/10.1080/09712119.2010.9707096>
- Liu, X., Yang, J., Ye, T. and Han, Z., 2018. Establishment of analysis method for methane detection by gas chromatography. *Earth and Environmental Science*, 113, p. 012023. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/113/1/012023>
- Limón-Hernández, D., Rayas-Amor, A.A., García-Martínez, A., Estrada-Flores, J.G., Núñez-López, M., Cruz-Monterrosa, R.G. and Morales-Almaraz, E., 2019. Chemical composition, *in vitro* gas production, methane production and fatty acid profile of canola silage (*Brassica napus*) with four levels of molasses. *Tropical Animal Health and Production*, 51, pp. 1579-1584. <http://doi.org/10.1007/s11250-019-01849-7>
- Martin, C., Ferlay, A., Mosoni, P., Rochette, Y., Chilliard, Y. and Doreau, M., 2016. Increasing linseed supply in dairy cow diets

- based on hay or corn silage: Effect on enteric methane emission, rumen microbial fermentation, and digestion. *Journal of Dairy Science*, 99, pp. 3445-3456. <http://doi.org/10.3168/jds.2015-10110>
- Martínez-Loperena, R., Castelán-Ortega, O.A., González-Ronquillo, M. and Estrada-Flores, J.G., 2011. Determinación de la calidad nutritiva, fermentación *In Vitro* y metabolitos secundarios en arvenses y rastrojo de maíz utilizados para la alimentación del Ganado lechero. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, pp. 525-536. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/605>
- Meale, S.J., Chavez, A.V., Baah, J. and McAllister, T.A., 2012. Methane Production of Different Forages in: *In vitro* Ruminant Fermentation. *Asian-Australasian Journal of Animal Science*, 25, pp. 86-91. <http://doi.org/10.5713/ajas.2011.11249>
- Mejía-Urbe, L.A., Domínguez-Vara, I.A., Hernández-Ruipérez, F., Rayas-Amor, A.A. and Morales-Almaraz, E. 2021. Fatty acid profile and in vitro rumen fermentation characteristics of maize silage augmented with canola silage. *South African Journal of Animal Science*, 51, pp. 212-220. <http://doi.org/10.4314/sajas.v51i2.9>
- Menke, K.H. and Steingass, H., 1988. Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and *in vitro* gas production using rumen fluid. *Animal Research and Development*, 28, pp. 7-55.
- Morales, A., Godoy, M., Beltrán, I., Muller, A., Balocchi, O. and Pulido, R., 2018. Changes in herbage mass and time of herbage allocation modify nutritional and metabolic status of dairy cows. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 78, pp. 409-418. <http://doi.org/10.4067/S0718-58392018000300409>
- Muciño-Álvarez, M., Albarrán-Portillo, B., López-González, F. and Arriaga-Jordán, C.M., 2021. Multi-species pastures for grazing dairy cows in small-scale dairy systems in the highlands of Mexico. *Tropical Animal Health and Production*, 53, p. 113. <http://doi.org/10.1007/s11250-021-02564-y>
- Murillo-Amador, B., Escobar, H.A., Fraga-Mancillas, H. and Pargas-Lara, R. 2001. Forage and grain yield of triticale and rye lines at Baja California Sur, Mexico. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 24, pp. 145-153.
- Niu, M., Kebreab, E., Hristov, A.N., Oh, J., Arndt, C., Bannink, A., Bayat, A.R., Brito, A.F., Boland, T., Casper, D., Crompton, L.A., Dijkstra, J., Eugene, M.A., Garnsworthy, P.C., Haque, M.N., Hellwing, A.L.F., Huhtanen, P., Kreuzer, M., Kuhla, B., Lund, P., Madsen, J., Martin, C., McClelland, S.C., McGee, M., Moate, P.J., Muetzel, S., Munoz, C., O'Kiely, P., Peiren, N., Reynolds, C.K., Schwarm, A., Shingfield, K.J., Storlien, T.M., Weisbjerg, M.R., Yanez-Ruiz, D.R. and Yu, Z., 2018. Prediction of enteric methane production, yield, and intensity in dairy cattle using an intercontinental database. *Global Change Biology*, 24, pp. 3368-3389. <http://doi.org/10.1111/gcb.14094>
- Niu, W., Wang, H., He, Y., Qiu, Q., Shao, T., Cao, B. and Su, H. 2020. Comparative analysis of wheat hay and silage in methane production, fermentation characteristics and microbiota using *in vitro* rumen cultures. *Applied Sciences*, 10, p. 8456. <http://doi.org/10.3390/app10238456>
- Plata-Reyes, D.A., Hernández-Mendo, O., Vieyra-Alberto, R., Albarrán-Portillo, B., Martínez-García, C.G. and Arriaga-Jordán, C.M., 2021. Kikuyu grass in winter-spring time in small-scale dairy systems in the highlands of central Mexico in terms of cow performance and fatty acid profile of milk. *Tropical Animal Health and Production*, 53, p. 225. <https://doi.org/10.1007/s11250-021-02672-9>
- Sainz-Ramírez, A., Estrada-Flores, J.G., Morales-Almaraz, E., Flores-Calvete, G., López-González, F. and Arriaga-Jordán, C.M., 2021. Effect of the inclusion of sunflower silage for cows in small-scale dairy systems in the highlands of Mexico. *Journal of Livestock Science*, 12, pp. 95-102. <http://doi.org/10.33259/JLivestSci.2021.95-102>
- Salas-Riega, C.Y., Osorio, S., del Pilar-Gamarra, Y., Alvarado-Volovich, A., Mauro-Osorio, C. and Gómez, C.A., 2022. Enteric methane

- emissions by lactating and dry cows in the high Andes of Peru. *Tropical Animal Health and Production*, 54, pp. 144. <http://doi.org/10.3168/jds.2010-4011>
- Theodorou, M.K., Williams, B.A., Dhanoa, M.S., McAllan, A.B., France, J.A., 1994. Simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminants feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 48, pp. 185–197. [http://doi.org/10.1016/0377-8401\(94\)90171-6](http://doi.org/10.1016/0377-8401(94)90171-6)
- Vega-García, J.I., Colín-Navarro, V., Estrada-Flores, J.G., Arriaga-Jordán, C.M. and López-González, F. 2021. *In vitro* nutritional value of black oat (*Avena strigosa*) in grazing or silage for small scale dairy systems. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24, p. 102. <http://doi.org/10.56369/tsaes.3499>
- Vega-García, J.I., López-González, F., Estrada-Flores, J.G., Flores-Calvete, G., Prospero-Bernal, F. and Arriaga-Jordán CM. 2020. Black oat (*Avena strigosa* Schreb.) grazing or silage for small-scale dairy systems in the highlands of central Mexico. Part I. Crop and dairy cow performance. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 80, pp. 515-525. <http://doi.org/10.4067/S0718-58392020000400515>
- Vega-García, J.I., López-González, F., Morales-Almaraz, E. and Arriaga-Jordán, C.M. 2021. Grazed rain-fed small-grain cereals as a forage option for small-scale dairy systems in central Mexico. *Tropical Animal Health and Production*, 53, pp. 511. <http://doi.org/10.1007/s11250-021-02958-y>
- Vega-García, J.I., López-González, F., Morales-Almaraz, E. and Arriaga-Jordán, C.M. 2023. Secondary growth rye or silage: small-grain cereals as a dual-purpose forage for small-scale dairy Systems in the highlands of Mexico. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 83, pp. 31-42. <http://doi.org/10.4067/S0718-58392023000100043>
- Velarde-Guillén, J., López-González, F., Estrada-Flores, J.G., Rayas-Amor, A.A., Heredia-Nava, D., Vicente, F., Martínez-Fernández, A. and Arriaga-Jordán, C.M., 2017. Productive, economic and environmental effects of optimised feeding strategies in small-scale dairy farms in the Highlands of Mexico. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, 111(1), pp. 225-243. <http://doi.org/10.12895/jaeid.20171.606>