



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA

**DETERMINACIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN DE METANO POR
FERMENTACIÓN ENTÉRICA DEL GANADO BOVINO PRODUCTOR
DE CARNE DE MEXICO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE MÉDICO
VETERINARIO ZOOTECNISTA**

P R E S E N T A

MARÍA DEL CARMEN ROJAS GUADARRAMA

ASESORES

DR. OCTAVIO ALONSO CASTELÁN ORTEGA

DR. MANUEL GONZÁLEZ RONQUILLO

DR. JORGE OSORIO ÁVALOS

Toluca, México, Mayo 2025

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN	5
2. REVISIÓN DE LITERATURA	9
2.1 Historia de la medición de emisiones de CH ₄ por el ganado bovino en México.	9
2.1 Emisiones de CH ₄ en bovinos.	11
2.2. Proceso de producción de CH ₄ en el rumen.	11
3. JUSTIFICACION	13
4. HIPÓTESIS	14
5. OBJETIVOS	15
5.1 Objetivo general	15
5.2 Objetivos específicos	15
6. MATERIALES Y MÉTODOS	16
6.1 Sitio experimental	16
6.2 Descripción de los animales y dieta experimental	16
6.3 Medición de la producción de CH ₄ en las cámaras de respiración de circuito abierto.	18
6.3.1 Proceso de calibración de las cámaras	19
6.3.2. Cálculo de factor de partición de la energía hacia metano (Y _m)	20
6.3.3. Cálculo de la emisión de CH ₄ por medición en las cámaras de respiración.	20

6.3.4. Cálculo del factor de emisión (FE) de CH ₄ por cabeza	21
6.4 Diseño experimental y análisis estadístico de los resultados	21
7. LÍMITE DE ESPACIO Y TIEMPO	22
7.1 Límite de espacio	22
7.2 Límite de tiempo	22
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
9. CONCLUSIÓN	25
10. LITERATURA CITADA	25

Agradecimientos

Se agradece el financiamiento para llevar a cabo el presente trabajo al proyecto de investigación CONAHCYT No. 317413 “Rescate y mejoramiento participativo de prácticas agroecológicas tradicionales de producción de carne y leche de las regiones de clima tropical de México para mejorar el autoabasto de alimentos de calidad de las familias campesinas vulnerables”.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático producido por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) es un problema que ha provocado preocupación en México y en el mundo debido a que genera graves consecuencias en el medio ambiente, y los agroecosistemas necesarios para la producción de alimentos de consumo humano. En agosto de 2021, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) informó sobre los cambios climáticos drásticos que está enfrentando el clima del planeta Tierra, la mayoría de estos cambios tienen antecedentes desde hace ya cientos de miles de años y muchos de ellos ya no podrán revertirse en periodos de tiempo cortos sino hasta después de varios siglos o incluso milenios (IPCC, 2013). Aunque estos cambios se vienen presentando debido a procesos naturales y de evolución, muchos han sido inducidos por factores de origen antropogénico: aproximadamente el 90% del cambio climático actual, derivado principalmente de la quema de combustibles fósiles (IPCC, 2021) y de actividades humanas. De seguir la tendencia actual, dichas actividades provocarán impactos ambientales mayores e irreversibles (IPCC, 2013). El sector agropecuario, forestal y otros usos de la tierra (AFOLU, por sus siglas en inglés) aporta ~24% de todas las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI) en el mundo, mientras que todas las especies domésticas de ganado emiten ~14.5% de emisiones antropogénicas de GEI, y sólo el ganado bovino emite 9.4% de emisiones (van Lingen et al., 2019). Entre los gases de efecto invernadero producidos por el sector AFOLU se encuentra el CO₂, N₂O y CH₄ (Petrescu et al., 2020), y la concentración atmosférica de este último se está incrementando rápidamente debido, entre otros factores, al aumento en el consumo de carne y leche de bovino (Liu et al., 20186). El CH₄ posee una capacidad de producir efecto invernadero 21-30 veces más alta con respecto al CO₂, considerándose que en determinado tiempo el CH₄ pueda ser predominante si se continúa la tendencia actual (Carmona et al., 2016). El CH₄ que producen los bovinos resulta de la fermentación de los alimentos en el rumen, y que en términos del uso de la energía por el animal constituye una pérdida del sistema, mientras que en términos ambientales contribuye al

calentamiento de la atmósfera y al cambio climático global, además de que este permanece en la atmósfera entre 9 y 15 años capturando el calor proveniente del sol (Eckard et al., 2010).

En México, esta problemática ha generado cuestionamientos sobre el papel que tiene la fermentación entérica de los rumiantes en el calentamiento global, ya que, a partir de la fermentación ruminal, y de la utilización de las proteínas del alimento y la posterior expulsión de la fracción no digerida de éstas a través de las heces y orina de los animales, se forman dos potentes gases de efecto invernadero, el metano (CH_4), y el óxido nitroso (N_2O) (FAO, 2006; Eckard *et al.*, 2010). Siendo la ganadería la tercera fuente más importante de emisiones de CH_4 . Se estima que la población actual de bovinos en México va en aumento contando con más de 36 millones de cabezas de ganado (SIAPO-SAGARPA, 2023); y tomando en cuenta que una vaca adulta produce en promedio 500 litros de CH_4 por día (358 g), se estima que los bovinos emiten aproximadamente 58 millones de ton por año de este gas, lo cual representa el 73% de total de las emisiones (80 millones) de todas las especies domésticas de México. El CH_4 es 72 veces más poderoso, en su capacidad de producir efecto invernadero, que el CO_2 (Klieve y Ouwerkerk, 2007), y tiene un promedio de vida en la atmósfera de 9-15 años, siendo los bovinos responsables del 15% de su emisión a nivel global (Kinsman *et al.*, 2005; Eckard *et al.*, 2010).

El inventario nacional del año 2015 refiere que México emitió 683 millones de toneladas de bióxido de carbono equivalente (MtCO_2e). De este inventario, del total de las emisiones el 64% correspondieron al consumo de combustibles fósiles, 10% se originaron por los sistemas de producción pecuaria, 8% provinieron de los procesos industriales, 7% se emitieron por el manejo de residuos, 6% por las emisiones fugitivas por extracción de petróleo, gas y minerías y 5% se generaron por actividades agrícolas. En el inventario también se contabilizaron 148 MtCO_2e absorbidas por la vegetación, principalmente en bosques y selvas. El balance neto

entre emisiones y absorciones para el año 2015 fue de 535 MtCO₂e, (INECC, S. 2015).

Existen diversos factores que influyen en el volumen de las emisiones de CH₄ como son raza del ganado, sistema de producción, tipo de alimentación, clima, eficiencia productiva, pH ruminal, estrés ambiental, tipo/población de microorganismos ruminales, etc. (Sejian *et al.*, 2011). De acuerdo con Mc Caughey *et al.* (1999) el 87% de la producción de CH₄ en los bovinos ocurre en el rumen, y solo el 13% en el tracto digestivo posterior. De esto último aproximadamente el 89% es absorbido hacia la sangre y expirado a través de los pulmones. Esto nos da a entender que cerca del 98% del total del CH₄ puede ser expirado a través de la boca y los orificios nasales. Por ello es muy importante enfocar los esfuerzos para reducir la producción de CH₄ a nivel del rumen (fermentación entérica) y no de las heces. Sin embargo, las estimaciones derivadas de los modelos matemáticos para el cálculo de las emisiones de GEI para el caso de los rumiantes a menudo carecen de la precisión necesaria para producir inventarios confiables (Kebreab *et al.*, 2008), por lo tanto, es necesario obtener datos derivados de experimentos con animales vivos. El uso del método Tier 1 del IPCC, que se usa en México para calcular el inventario de CH₄, es poco preciso, ya que utiliza factores de emisión por defecto, desafortunadamente este método no toma en cuenta factores tan importantes para el cálculo de los inventarios como es la división del país en zonas geo-climáticas, las etapas productivas del ganado y su fin productivo.

En este sentido el empleo del modelo Tier II propuesto por el IPCC en 2006, es una mejor aproximación y de mayor confiabilidad, sin embargo, su uso se basa en el uso de factores de emisión de CH₄ localmente determinados. Últimamente se han usado varias técnicas y equipos para recoger dichos datos *in vivo*, pero una técnica eficaz para la medición de las emisiones gaseosas del rumen y de la respiración del ganado es el uso de sistema de cámaras de respiración de circuito abierto (CR). El uso de las CR se considera el método “estándar de oro” por su precisión y exactitud,

y ha sido utilizado en todo el mundo para determinar los factores de emisión (FE) de CH₄ por fermentación entérica en bovinos. En México recientemente se emplearon CR para determinar FE de CH₄ para ganado lechero (Castelán-Ortega et al., 2020), ganado cebuino (Canul-Solís et al., 2017), y era necesario obtener FE para ganado productor de carne en las regiones de clima seco y muy seco alimentado con forrajes de relativa baja calidad nutricional durante su etapa de crecimiento, la cual dura la mayor parte de su vida, ya que el período de ceba o engorda tiene una duración de hasta seis meses.

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue determinar los factores de emisión de CH₄ por fermentación entérica para el ganado productor de carne alimentado con una dieta típica con forrajes de baja calidad nutricional de las regiones de clima seco y muy seco de México.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Historia de la medición de emisiones de metano (CH₄) por el ganado bovino en México.

González *et al.* (1995) calcularon por primera vez las emisiones de CH₄ generadas por el ganado bovino en México, utilizando la metodología del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de 1994, para la cuantificación de las emisiones de CH₄ generado por la fermentación entérica y el estiércol en bovinos, sin embargo, utilizaron FE por defecto tomados de la literatura, ya que no se contaba con FE localmente determinados.

Así mismo, González-Avalos (1999) realizó investigaciones sobre la determinación experimental de los factores de emisión de CH₄ por excretas de bovino en México, para diferentes climas de la República Mexicana. También, Odóñez *et al.* (2006) presentaron las estimaciones de las emisiones de los GEI generados en el sector agrícola, mediante la actualización de los valores de los factores de emisión y los datos de las actividades agrícolas y pecuarias de México.

En el año 2007, INE-SEMARNAT (2006), presentaron en el “Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero” las emisiones promedio de CH₄ en México para el período de 1990 – 2002, equivalentes a 1,823 Gg, como suma de la fermentación entérica y el manejo de estiércol; así también, las emisiones generadas fueron principalmente por el ganado bovino, donde el ganado de carne y doble propósito produjeron el 89% de todas las emisiones, el lechero fue el responsable del 10% y los demás animales el 1% restante.

Estas estadísticas fueron actualizadas por SEMARNAT (2009), para el caso de las emisiones de CH₄ y N₂O generadas durante los años 2004, 2005 y 2006 en el sector Agricultura de México, empleando la metodología propuesta y validada por el IPCC versión 1996, presentando sus resultados en el “Inventario Nacional de Gases de

Efecto Invernadero 2009". Este estudio contribuyó en el seguimiento de las estimaciones de GEI del sector agricultura en México. De la misma forma, SEMARNAT (2012), a través en la Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático de México, señala que las emisiones de GEI expresadas en unidades de bióxido de carbono equivalente (CO₂-eq) para 2010 del sector agrícola fueron de 12.3% (92,184.6 Gg de CO₂-eq) y las emisiones de CH₄ fueron de 7,938.9 Gg, lo que representa un incremento de 59.8% con respecto a 1990. En esta comunicación se indicó que la fermentación entérica contribuye a las emisiones de CH₄ con el 22.8% (37,961.5 Gg de CO₂-eq) y el manejo del estiércol sólo con el 9.3% (7,553.5 Gg de CO₂-eq) del sector. Por otro lado, el GEM-PRONATURA (2013) desarrolló su Inventario Estatal de Gases de Efecto Invernadero 2013, en donde reporta que las emisiones de GEI provenientes de la agricultura son de 3,368.10 Gg de CO₂-eq para el año base 2005, mientras que, para el año 2010 corresponden a 3,388.28 Gg de CO₂-eq, presentando un incremento en las emisiones del 0.60% para el caso del estado de México.

Castelán-Ortega *et al.* (2014) en su investigación del modelado de las emisiones de CH₄ y los inventarios de CH₄ de los sistemas de producción ganadera en México, señalan que la fermentación anaeróbica de los carbohidratos estructurales en el rumen de los bovinos genera productos de desecho como ácidos grasos volátiles (AGV), calor de fermentación, CO₂ y gas CH₄, y concluye en una primera aproximación que las emisiones CH₄ por fermentación entérica del ganado bovino en México ascienden a 2.02 Tg/año para un total de 23 millones de cabezas de ganado. Sin embargo, ahora se reconoce que la emisión es mayor en virtud de que la población de ganado es de aproximadamente 32 millones de cabezas. En su más reciente estudio el grupo del doctor Octavio Castelán propone una cifra de 2.039 Tg CH₄/año para todo México incluyendo todos los tipos y propósitos de ganado bovino (Ángeles-González *et al.*, 2024). En estos estudios se emplearon factores de emisión localmente determinados.

2.1 Emisiones de CH₄ en bovinos.

Los bovinos poseen un sistema digestivo que tiene la capacidad de aprovechar y convertir material fibroso con altos contenidos de carbohidratos estructurales en alimentos de alta calidad nutritiva, la carne y la leche. Sin embargo, por sus características innatas, este mismo sistema digestivo también produce metano, un potente gas con efecto invernadero que contribuye con aproximadamente el 18% del calentamiento global ocasionado por actividades productivas con animales domésticos, superado sólo por el CO₂ (Et Montenegro, 2000).

La agricultura y la producción pecuaria contribuyen ampliamente a las emisiones antropogénicas de CH₄, CO₂ y N₂O a la atmósfera. El aumento de las concentraciones de estos gases provoca un calentamiento de la superficie terrestre y la destrucción de la capa de ozono en la estratosfera (Carmona, 2005). Dentro de la gama de gases a los que se les atribuye efecto invernadero, se considera el CO₂ el más abundante y el que actualmente tiene un mayor aporte al incremento del calentamiento global. Hoy día las concentraciones de CH₄ son inferiores a las de CO₂; sin embargo, el primero se está incrementando rápidamente y además posee un efecto 21-30 veces más contaminante con respecto al CO₂, considerándose que en el tiempo el CH₄ pueda ser predominante (Carmona, 2005). Las tasas de acumulación de CH₄ y dióxido de carbono en la atmósfera han cambiado drásticamente en los últimos años presentándose un incremento de forma exponencial.

2.2. Fermentación de los nutrientes en el rumen.

La descomposición anaeróbica de la materia orgánica (MO) a CH₄ y CO₂ es un proceso microbiano complejo que requiere la cooperación o interdependencia de bacterias fermentativas anaeróbicas y archaeas metanogénicas. Las bacterias del rumen hidrolizan y fermentan los polímeros y compuestos de la MO. Durante la degradación ocurren reacciones de conservación de energía. Sin embargo, debido a la ausencia de oxígeno, por cada molécula de glucosa metabolizada, solo hay una

ganancia neta de dos moléculas de ATP y dos NADH. En general, en las dietas para rumiantes los carbohidratos constituyen entre el 70 y 80% de la materia seca (MS), y se clasifican en carbohidratos estructurales, la cual es una fracción constituida por las paredes celulares (celulosa, hemicelulosa y lignina); y en carbohidratos no estructurales, que son el almidón, fructanos, y ácidos orgánicos (Hall, 2014). La celulosa es el polímero más abundante en la naturaleza y se ha estimado que 7.5×10^{10} toneladas son sintetizadas anualmente a través de los procesos fotosintéticos (Carere et al., 2008). Además, la celulosa es el componente primario de las paredes celulares de las plantas. Sin embargo, los animales superiores no secretan enzimas digestivas que puedan digerir la celulosa, por lo que dependen de las enzimas microbianas. La digestión pre-gástrica se desarrolló desde hace aproximadamente 35 millones de años, lo que les permitió a los rumiantes ocupar un nicho ecológico muy amplio (Pérez-Barberia et al., 2004). En el rumen, a diferencia de otros hábitats, la digestión de la celulosa y otros compuestos unidos con enlaces $\beta 1$ (hemicelulosa, fructosanos, pectina) se realiza en mayor medida por unas cuantas especies de bacterias que se adhieren directamente a la superficie de las fibras (Weimer, 1998). Los científicos están de acuerdo en que la principal actividad celulolítica proviene de bacterias primarias, en particular *Fibrobacter succinogenes*, *Ruminococcus flavefaciens* y *Ruminococcus albus*, aunque también se reconoce que hay otros microorganismos (hongos, protozoarios, bacterias no especializadas) secundarios que tienen un papel en el proceso (Weimer, 1996).

2.3. Proceso de producción de CH₄ en el rumen

Los rumiantes son una de las principales fuentes de CH₄ liberado en la atmosfera, ya que producen alrededor del 33% del total de las emisiones antropogénicas de este gas (Eckard et al., 2010). El CH₄ es un subproducto natural del proceso digestivo de los rumiantes, donde las bacterias arqueas metanogénicas presentes en el rumen usan el CO₂ e H₂ que se originan a partir de la fermentación microbiana

de la fibra de las plantas, para formar CH_4 y reducir la acumulación de H_2 en el rumen. El CH_4 no se usa por el animal como fuente de energía y se elimina a través de los pulmones o el eructo hacia la atmosfera (Crutzen *et al.*, 2006). Por lo tanto, la producción de CH_4 en rumiantes representa una pérdida de energía para el sistema, la cual puede llegar a representar hasta 7% del total de la energía bruta ingeridas por el animal en un día (Crutzen *et al.*, 2013).

La mayoría del CH_4 entérico es generado en el rumen (85-95%) y solo un 5-15% del total se genera en el intestino grueso. El CH_4 es producido por las arqueas metanogénicas y se forma a partir de los productos restantes de la fermentación de la materia orgánica de los alimentos. La mayoría de las arqueas genera CH_4 a partir de CO_2 e hidrogeno, siendo minoritarios las que producen CH_4 por reducción del ácido acético ($\text{CH}_3\text{COOH}-\text{CH}_4+\text{CO}_2$). Otras fuentes menores para la síntesis de CH_4 son el ácido fórmico, las metilaminas, el metanol y el sulfuro de metilo. La cantidad de CH_4 entérico generada diariamente por un rumiante depende de múltiples factores. Entre los factores dietéticos que afectan a la producción de CH_4 destacan la cantidad de materia orgánica fermentada, el tipo de macromoléculas (almidón, proteínas, celulosa, etc.) y el perfil de los ácidos grasos volátiles (AGV) producidos en la fermentación ruminal (Travieso *et al.*, 2018).

Este proceso de síntesis de CH_4 funciona como sumidero de hidrógeno (H_2), al reducir su acumulación en el rumen, y evitando de esta manera trastornos digestivos y metabólicos en el animal (Benaouda *et al.* 2018; Ku-Vera *et al.* 2020). Aunque la producción de CH_4 esta modulada principalmente por los metanógenos, también influye la interacción con el resto de los microorganismos del rumen (Popova *et al.* 2011). Por ejemplo, existe una estrecha simbiosis entre arqueas metanogénicas y protozoarios ciliados, esta asociación facilita la transferencia de H_2 entre dichas especies (Vogels *et al.* 1980; Hook *et al.* 2010). También, el tipo de carbohidratos en la dieta puede definir el tipo de fermentación y por ende la cantidad de CH_4 entérico producido por el animal, los carbohidratos estructurales de los forrajes

agrupados en la porción conocida como fibra detergente neutro (FDN) dirigen la fermentación ruminal a una de tipo acética, donde teóricamente se liberan ocho iones de hidrógeno por cada mol de acetato producido, mientras que una fermentación de tipo propiónica, dada por una dieta mayoritaria en alimentos concentrados, los captura para su producción (Johnson & Johnson 1995; Moss & Givens 2002).

3. JUSTIFICACION

El calentamiento global es un problema que conlleva consecuencias tanto ambientales como socioeconómicas, ya que al incrementarse los niveles de CH₄ y otros GEI, se incrementa la temperatura de la atmósfera generando múltiples cambios climáticos y por ende desastres naturales que dan como consecuencia pérdidas económicas; se estima que en el año 2030 aumente un grado centígrado la temperatura promedio mundial (Knapp *et al.*, 2014).

En 2023 y 2024 la región norte del país sufrió una severa sequía, la cual, entre otras cosas, se manifestó en la falta de pastos y forrajes para alimentar al ganado, y, por otro lado, se han presentado inundaciones severas en los estados del Golfo de México como Tabasco y Veracruz, las cuales han afectado la producción ganadera nacional, provocando la pérdida de miles de cabezas de ganado, mostrando claramente como el cambio climático está afectando en diversos factores.

El presente trabajo de investigación se enfocó en el estudio de la variabilidad en la emisión de CH₄ entérico por el ganado bovino productor de carne de clima muy seco (con temperaturas arriba de los 40° C y por debajo de los 0°C, con bajas precipitaciones), explicar dicha variabilidad mediante factores relacionados con el animal y su dieta, ya que estos son una de las razones, del calentamiento global, ya que poseen un sistema digestivo que tiene la capacidad de aprovechar y convertir material fibroso con altos contenido de hidratos de carbono estructurales, en alimentos de alta calidad nutritiva, pero debido también a sus características innatas producen CH₄, que no solo produce una pérdida de energía para el animal, que representa un 6.5% de la energía bruta consumida por el rumiante (IPCC,2006), sino que también la emisión de GEI, siendo responsables de más de 90 % de estas emisiones, debido a la elevada población de bacterias productoras de CH₄ en el retículo-rumen (Moss *et al.*,2000).

Por lo tanto, la mitigación de las emisiones de GEI y gases acidificantes como el amoníaco (NH_3) es una prioridad en todo el mundo, en el caso de México, al no existir factores de emisiones de CH_4 por región climática y función productiva del ganado surge la necesidad de generarlos con el objeto de llevar a cabo los inventarios de emisiones de CH_4 por fermentación entérica de bovinos de México. Es necesario también concentrarse en los diversos factores que afectan su producción, entre los cuales son el tipo de animal, el tipo de dieta, estado fisiológico y el nivel de alimentación, siendo los dos primeros los más importantes para la reducción de emisiones y para el desarrollo de estrategias de alimentación adecuadas para cada región climática. El desarrollo de estrategias para reducir las emisiones de CH_4 dará beneficios tanto económicos como ventajas ambientales, ya que permitirá una mayor eficiencia en el uso de energía de las dietas en bovinos en las regiones de clima muy seco, pero el primer paso es generar la línea base a partir de la cual se pueda determinar los avances en los esfuerzos de mitigación de este potente gas de efecto invernadero.

4. HIPÓTESIS

El factor de emisión anual de CH₄ por fermentación entérica del ganado bovino productor de carne en México es menor del que se utiliza en el método Tier 1 del IPCC (2006) para el cálculo de los inventarios en México.

La dieta del ganado es el factor más importante en la emisión de CH₄, y en ésta influye la zona geográfica y el tipo de alimentación que se suministre a los animales.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general.

Determinar factores de emisión de CH₄ por fermentación entérica para el ganado productor de carne alimentado con una dieta típica con forrajes de baja calidad nutricional de las regiones de clima muy seco de México.

5.2 Objetivos específicos.

- Estudiar el efecto de una dieta tipo de la región de clima muy seco sobre las emisiones de CH₄.
- Determinar el consumo de materia seca (CMS), la digestibilidad aparente in vivo de la (DMS).
- Obtener el factor de partición de la energía consumida hacia CH₄ (Y_m) para la región Geo-climática correspondiente al clima muy seco de México.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Sitio experimental.

El estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Ganadería, Medio Ambiente y Energías Renovables de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma del Estado de México, ubicada en el Cerrillo Piedras Blancas, municipio de Toluca, Estado de México, cuya ubicación geográfica es 19°27' N y 98°38', una altitud de 2,600 m sobre el nivel del mar, temperatura promedio de 14 °C y precipitación pluvial anual de 900 mm (INEGI, 2016).

6.2 Descripción de los animales y dieta experimental.

Se utilizaron **seis bovinos de raza Charoláis** con un peso vivo (PV) promedio de **405±48 kg**.

Dietas experimentales: Se formularon dos raciones completamente mezcladas (RCM), en una el forraje principal fue rastrojo de maíz (RM), y en la segunda fue paja de avena (PA), además ambas contenían 3.7% pasta de soja, 7% de alfalfa achicalada, 11.9% de maíz molido, 12.1% de desperdicio de panadería, 6.7% de salvado de trigo. La relación forraje: concentrado para ambas fue de 58.6%: 41.4%. El cuadro 1 describe la composición de cada una de las dietas experimentales.

Cuadro 1: Inclusión en base seca (g/100 g MS) de los ingredientes utilizados en las dietas experimentales.

Ingrediente de la dieta	Rastrojo de maíz (RM)	Paja de avena (PA)
Rastrojo maíz	58.6	0.0
Paja avena	0.0	58.6
Heno de alfalfa	7.0	7.0
Pasta de soja	3.7	3.7
Maíz molido	11.9	11.9
Galleta	12.1	12.1
Salvado de trigo	6.7	6.7
Total	100.0	100.0

Las dietas fueron establecidas de acuerdo con el procedimiento de Castelán *et al.* (2017) para cubrir las necesidades de energía y proteína metabolizables de acuerdo con el sistema AFRC (1993). Los animales recibieron las dietas experimentales por un período de 25 días, 3 animales para cada una de las dietas, de los cuales 20 días fueron de adaptación a la dieta y los últimos cinco días se usaron para medir la emisión de CH₄, CMS y DMS, durante estos cinco días los animales permanecieron dos días dentro de las cámaras de circuito abierto para medir la emisión de CH₄, El CMS y la DMS se midieron durante los 5 días, incluidos el tiempo que los animales permanecieron en las CR. Se midieron diariamente las cantidades de ingesta de alimento y los rechazos, pero para el análisis estadístico sólo se contabilizaron los datos de los últimos 5 días; se recogieron muestras de heces diariamente durante esos últimos días y el 10% de las muestras totales de heces se congelaron a -20°C para su posterior análisis. Las muestras fecales se secaron durante 72 h a 60 °C, se trituraron con un tamiz de 1 mm (molino Wiley) y se mezclaron a partes iguales para obtener una alícuota fecal por bovino.

Análisis químicos de las muestras: Las muestras de heces y alimento se analizaron según AOAC International (1990) para determinar la materia seca (MS; método n° 934.01), la materia orgánica (MO, método n° 942.05), la proteína cruda (PB; método n° 981.10), cenizas (Ceniza; método 94205). La fibra detergente neutro (FDN), la fibra detergente ácido (FDA) y la lignina se determinaron según Van Soest (1991) con la adición de sulfito sódico y alfa amilasa utilizando un sistema de fibra ANKOM. La proteína cruda se determinó por el método 991.20) (AOAC, 1990), para nitrógeno y el resultado se multiplicó por 6.25. Todos los análisis químicos se realizaron por duplicado. El Cuadro 2 presenta sólo la composición química de los dos forrajes utilizados por ser estos los principales componentes de las dietas experimentales.

El coeficiente de DMS se determinó según Wiseman (2018) de la siguiente manera

Digestibilidad (g/kg) = (CMS – peso de heces excretadas) / (CMS) × 100.

Se registraron el peso corporal individual (PV, kg) y el cambio de peso corporal (PCC, g/d) al principio y al final de cada periodo experimental.

Cuadro 2. Composición química de los ingredientes usados en las dietas experimentales en porcentaje.

Variable	Rastrojo de maíz (RM), % BS	Paja de avena (PA), % BS
Materia seca, MS	89.8	92.3
Materia orgánica, MO	93.5	94.2
Proteína cruda, PC	6.0	6.9
Fibra detergente neutro, FDN	75.4	57.2
Fibra detergente ácido, FDA	42.2	25.4
Cenizas	6.5	5.8
Energía bruta, EB, MJ/kg MS	17.5	17.5

6.3 Medición de la producción de CH₄ en las cámaras de respiración de circuito abierto.

Las mediciones de la emisión de CH₄ por fermentación entérica se llevó a cabo con dos cámaras de respiración de circuito abierto según lo describe Vázquez-Carrillo et al. (2022). A continuación, se hace una breve descripción de las características de las cámaras y de su funcionamiento. La Figura 1 muestra que cada cámara cuenta con un comedero semicilíndrico con dimensiones de 1.0m x 0.75 x 0.50 con capacidad de 20 kg de MS y un bebedero con capacidad de 90 litros, tapetes acojinados y antiderrapantes para confort del animal, así como aire acondicionado más deshumidificador programado a una temperatura promedio de 16°C y una charola recolectora de heces y orina para estudios de digestibilidad y calorimetría.

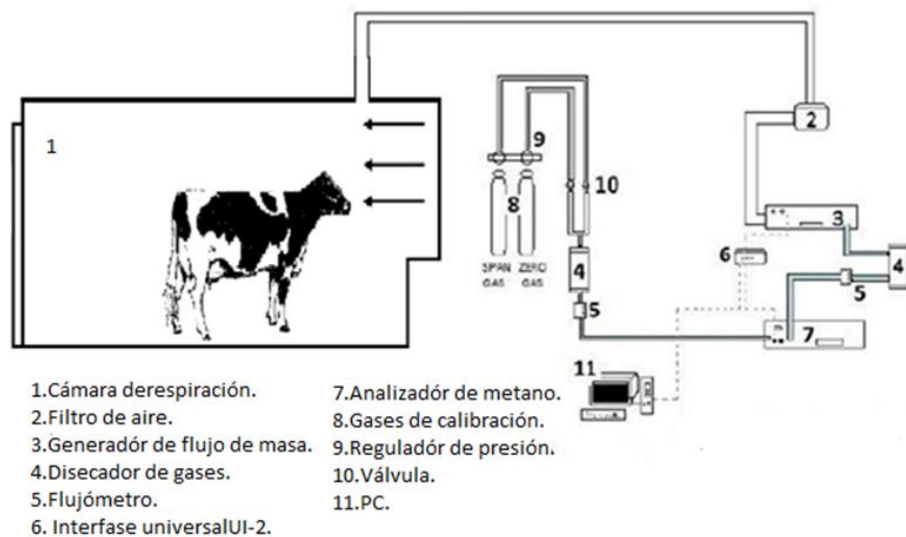


Figura 1. Disposición y componentes de la cámara de circuito abierto para medir la emisión de gases CH_4 y CO_2 del laboratorio de Ganadería, Medio Ambiente y energías renovables de la Universidad Autónoma del Estado de México.

6.3.1 Proceso de calibración de las cámaras.

Antes de cada experimento el analizador de CH_4 fue calibrado mediante dos tipos de gases: Uno libre de CH_4 (nitrógeno puro) para calibrar al punto “cero” y una mezcla de gases que contiene una concentración conocida de CH_4 (0.099%). Dicha calibración fue realizada previa a cada medición. Se suministró una cantidad conocida de la dieta experimental correspondiente, la cual se pesó y al final de la medición se midió el rechazo, al igual las heces contenidas producidas por los animales dentro de las cámaras, las cuales, como ya se mencionó, fueron recolectadas y pesadas para determinar la digestibilidad aparente. Posteriormente, se tomó una muestra de la dieta y de las heces (aprox. 1 kg), de las cuales se obtuvieron submuestras (aprox. 5g), que se colocaron en charolas de aluminio, previamente pesadas, estas se utilizaron para obtener el contenido de materia seca

(MS%) y la digestibilidad secando una muestra en una estufa de aire forzado a 135°C por 2h.

6.3.2. Cálculo de factor de partición de la energía hacia metano (Ym).

El porcentaje de la energía bruta (EB) consumida por el ganado bovino que es convertido a CH₄ tiene el nombre de **Ym**. El IPCC (2006) propone un factor por defecto de 6.5% de la EB ingerida perdida en forma de CH₄, dicho valor es usado para calcular las emisiones de CH₄ por fermentación entérica para los rumiantes a nivel mundial empleando el método propuesto por el IPCC (2006) en su nivel Tier 2. Para el cálculo de este factor, es indispensable la determinación del contenido de la EB de la dieta, las heces y la perdida por la emisión de CH₄. El cálculo de Ym se llevó a cabo de la siguiente manera:

$$Ym (\%) = (EB \text{ en perdida como metano MJ/d} / EB \text{ consumida, MJ/d}) * 100$$

6.3.3. Cálculo de la emisión de CH₄ por medición en las cámaras de respiración.

El procedimiento para el cálculo de la emisión de CH₄ se llevó a cabo al terminar la medición en las cámaras de circuito abierto, el cual se realizó en ciclos de 24 horas y los datos fueron exportados del programa EXPEDATA a una hoja de cálculo de Excel. EXPEDATA proporcionó la emisión de CH₄ en Volts por segundo; dichos datos se multiplican por el factor 0.2 para transformar de volts a porcentaje de CH₄. Ahora bien, para determinar la cantidad de emisión de CH₄ en litros, se multiplicó el flujo de aire salido de la cámara por minuto por 1000. Debido a que los resultados son presentados en litros de CH₄ /minuto, el resultado se multiplica por 60 (que es el número de minutos en una hora) y posteriormente por 24 para conocer lo que se produce de metano (CH₄) en un día.

6.3.4. Cálculo del factor de emisión (FE) de CH₄ por cabeza de bovino.

Para el cálculo de la emisión de CH₄ por fermentación entérica, el modelo TIER I considera niveles de actividad y factores de emisión por cabeza (FE); los primeros provienen de inventarios nacionales y los segundos de valores por defecto especificados por regiones continentales y sistemas productivos. La emisión de CH₄ resulta de la multiplicación del nivel de actividad por el FE, para la estimación que se realizó, al ser TIER 2, el FE se calcula a partir del consumo de energía neta para mantenimiento. El CH₄ se deriva de la energía ingerida, dicho lo anterior, la emisión de CH₄ se considera proporcional a la ingesta de energía bruta (EB) de la dieta (Córdor, 2008).

6.4 Diseño experimental y análisis estadístico de los resultados.

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, en donde los seis animales fueron asignados al azar; tres bovinos a cada una de las dietas. Los datos sobre el CMS, DMS, emisión de CH₄ y factor Y_m se analizaron estadísticamente mediante un análisis de varianza utilizando el procedimiento modelo general lineal del programa informático Minitab versión 14, utilizando el siguiente modelo:

$$Y_i = \mu + T_i + e_i.$$

Dónde Y_i es CMS, DMS, CH₄; μ es la medida global; T_i es el efecto del tratamiento: RM o PA; y e_i es el error experimental (Steel et al., 1997).

Así mismo, se calcularon las medias de los mínimos cuadrados y se comprobaron las diferencias mediante la prueba de Tukey. Las diferencias de las medias de mínimos cuadrados fueron significativas a $p \leq 0,05$, y la de $p \leq 0,10$ se consideró una tendencia.

7. LÍMITE DE ESPACIO

7.1 Límite de espacio.

El estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Ganadería, Medio Ambiente y Energías Renovables, de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma del Estado de México, ubicada en el Cerrillo Piedras Blancas, municipio de Toluca, Estado de México, cuya ubicación geográfica es 19°27' N y 98°38', una altitud de 2,600 m sobre el nivel del mar, temperatura promedio de 14 °C y precipitación anual de 900 mm (INEGI, 2016).

8. LÍMITE DE TIEMPO

8.2 Límite de tiempo.

Con un límite de tiempo a partir del 20 de noviembre de 2024.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La producción de CH₄ en el ganado bovino es uno de los aspectos más relevantes en la ganadería desde el punto de vista ambiental debido a su impacto en el cambio climático (Johnson y Johnson, 1995), este gas generado principalmente durante la fermentación entérica en el rumen es un proceso digestivo complejo en el que intervienen los microorganismos encargados descomponer la fibra de los forrajes. La cantidad CH₄ de producida está estrechamente relacionada con el CMS, la composición de la dieta del ganado en particular con la cantidad y tipo de fibra en los forrajes (Benaouda et al., 2020). El Cuadro 3 presenta los resultados obtenidos en el presente trabajo, en donde podemos observar que existen diferencias significativas ($P < 0.004$) para las emisiones diarias de CH₄ en el tratamiento PA en comparación con RM, en el cual se observa que el RM fue 24% mayor en la emisión diaria de este gas con respecto a la PA. Otro hallazgo importante es la producción

de CH₄ por día en gramos, la cual de también es considerablemente mayor (P<0.05) en el RM con respecto a la PA con un 23%.

Cuadro 3. Resultados promedio para emisiones, rendimiento y factor Ym de CH₄, CMS y DMS para ambas dietas experimentales.

Tratamiento	CH ₄ , L/24 h	CH ₄ , g/24 h	CH ₄ , g/ Kg MS	Ym, %	CMS, kg MS/d	DMS, %
Paja de avena	270.6a ±21	193.7 a ±15	19.0 a ±0.6	6.0 a	10.1 a ±0.7	59.2 a ±1.7
Rastrojo de maíz	335.7 b ±10	240 b ±7.0	27.5 b ±1.7	9.44 b	9.3. b ±0.5	58.0 b ±2.0
Valor de P	0.004	0.004	0.001	0.001	0.3	0.6

Valores después de la media representan la desviación estándar.

Se sabe que la emisión de CH₄ entérico de los bovinos aumenta a medida que aumenta el contenido de fibra en la dieta. Sin embargo, esta relación lineal positiva puede no funcionar en algunas regiones donde la fibra de la dieta es alta y tiene baja calidad lo que puede reducir el consumo de materia seca y la digestibilidad (Benaouda, 2017). Por ejemplo, Benaouda et al. (2017) reporta que a mayor digestibilidad y calidad en la fibra presente en la dieta la emisión de CH₄ es mayor debido a la alta cantidad de sustratos disponibles para los organismos metanógenos, como lo son las bacterias arqueas. De igual, manera en los resultados obtenidos en cuanto a la DMS se observa que ésta fue similar entre tratamientos (P>0.05), ya que los bovinos alimentados con RM tuvieron una digestibilidad del 58% mientras que los que fueron alimentados con PA fue de un 59%, lo que nos da a entender ambos forrajes una digestibilidad similar. Finalmente, se observa que para el CMS se observó que los resultados obtenidos fueron similares (P>0.05) entre ambos forrajes; en PA se obtuvo un 10.1 kg MS/d y en RM fue de 9.3 kg MS/d, lo que nos sugiere que ambos forrajes presentaban digestibilidades similares.

Por otro lado, llama la atención que la inclusión de paja de avena hasta un 60 % de la dieta para bovinos de carne alimentados en un sistema de producción de una región de clima seco a muy seco puede resultar en un factor Y_m 6.0, el cual es similar al del IPCC (2006) , sin embargo, el uso de rastrojo de maíz en dietas para bovinos incrementa este factor hasta 8%, sin afectar el CMS y la DMS en ambas dietas, esto origina que se emita 23 % más CH_4 por día en bovinos alimentados con rastrojo de maíz con respecto a paja de avena. El mayor contenido de FDN y FDA en el RM de maíz con respecto a la PA podría explicar las grandes diferencias observadas tanto para la emisión diaria como para el rendimiento y el factor Y_m , como fue descrito por Benaouda et al. (2020).

La fibra en los forrajes juega un papel crucial en la producción de CH_4 por fermentación entérica en el ganado bovino (Bonilla, 2012). Aunque la fibra es necesaria para una adecuada función ruminal, los forrajes con altos niveles de fibra insoluble, como los pastos de madurez avanzada, tienden a generar mayores emisiones de CH_4 . En este sentido, mejorar la calidad de los forrajes y aplicar estrategias de manejo y suplementación dietética puede contribuir significativamente a reducir las emisiones de CH_4 , sin comprometer la eficiencia de la producción animal.

Finalmente, se observa que los FE de CH_4 obtenidos en el presente estudio son superiores al FE por defecto de 50 kg de CH_4 /año/cabeza utilizado normalmente en el cálculo de los inventarios en México, ya que para el tratamiento PA fue de 70.7 kg de CH_4 /cabeza/año y para el tratamiento RM fue de 87.6 kg de CH_4 /cabeza/año, lo cual resalta la importancia de generar FE localmente determinados con el objeto de contar con inventarios más precisos y confiables. Las investigaciones sobre este tema deben continuar en apoyo también al desarrollo de prácticas ganaderas sostenibles, las cuales serán claves para mitigar el impacto ambiental de la ganadería en el contexto del cambio climático.

10. CONCLUSIÓN

Los resultados de este trabajo sugieren que la FDN y la FDA juegan un papel muy importante en la emisión de CH₄ en dietas donde se emplean forrajes de baja calidad, siendo la emisión de CH₄ mayor cuando el contenido de estas es más alto en los forrajes. Así mismo, podemos concluir que los FE obtenidos son más altos que los FE por defecto del IPCC, resaltando la importancia de generar FE propios para cada país y las diferentes regiones geo climática dentro de cada país.

11. LITERATURA CITADA

- Allan, R. P., Arias, P. A., Berger, S., Canadell, J. G., Cassou, C., Chen, D., ... & Zickfeld, K. (2023). Intergovernmental panel on climate change (IPCC). Summary for policymakers. In *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 3-32). Cambridge University Press.
- Appuhamy, J. A., France, J., & Kebreab, E. (2016). Models for predicting enteric methane emissions from dairy cows in North America, Europe, and Australia and New Zealand. *Global Change Biology*, 22(9), 3039-3056.
- Benaouda, M., González-Ronquillo, M., Appuhamy, J. A. D. R. N., Kebreab, E., Molina, L. T., Herrera-Camacho, J., ... & Castelán-Ortega, O. A. (2020). Development of mathematical models to predict enteric methane emission by cattle in Latin America. *Livestock Science*, 241, 104177.
- Bonilla Cárdenas, J. A., & Lemus Flores, C. (2012). Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático: Revisión. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 3(2), 215-246.
- Carere, C.R., Sparling, R., Cicek, N. and Levin, D.B. (2008) 'Third Generation Biofuels via Direct Cellulose Fermentation', *International Journal of Molecular Sciences*, 9(7), pp. 1342–1360. doi: 10.3390/ijms9071342.

- Carmona, C. J., Bolivar, D. M., Giraldo, L. A. 2005. El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Rev. Col. Cienc. Pec.* 2005; Vol. 18:1; 49- 63.
- Carro Travieso, M. D., Evan, T. D., & Gonzalez Cano, J. (2018). Emisiones de metano en los animales rumiantes: influencia de la dieta. *Albéitar*, 220, 32-35.
- Castelán-Ortega, OA, Ku-Vera, JC, & Estrada-Flores, JG (2014). Modelación de emisiones de metano e inventarios de metano para sistemas de producción ganadera en México. *Atmósfera* , 27 (2), 185-191.
- Condor, R. D., Valli, L., De Rosa, G., Di Francia, A. and De Lauretis, R. 2008. Estimation of the methane emission factor for the italian mediterranean buffalo. *The Animal Consortium. Animal* (2008), 2:8, pp 1247-1253.
- Cruz Matías, C. Modelización de emisiones de gases de efecto invernadero de la cadena de valor para ganado bovino de México y desarrollo de una alternativa sustentable.
- de Jong, B., Olgún, M., Rojas, F., Maldonado, V., Paz, F., Etchevers, J., ... & Hernández, T. (1990). Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990 a 2006. *Actualización del inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero, 2006*.
- Gómez Rosales, S., Ángeles, M. D. L., Romano Muñoz, J. L., & Ruíz Corral, J. A. (2020). Estimación de la producción de metano entérico en ranchos de producción familiar de leche bovina en el sur del estado de Querétaro, México. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 11, 18-33.
- Hassanat, F., Gervais, R., Julien, C., Massé, D. I., Lettat, A., Chouinard, P. Y., ... & Benchaar, C. (2013). Replacing alfalfa silage with corn silage in dairy cow diets: Effects on enteric methane production, ruminal fermentation, digestion, N balance, and milk production. *Journal of Dairy Science*, 96(7), 4553-4567.

- Hristov, A. N., Lee, C., Cassidy, T., Heyler, K., Tekippe, J. A., Varga, G. A., ... & Brandt, R. C. (2013). Effect of *Origanum vulgare* L. leaves on rumen fermentation, production, and milk fatty acid composition in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *96*(2), 1189-1202.
- IPCC, 2006. Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol. Capítulo 10. En Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volúmen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, pp. 10.1–10.87. <http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.
- IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2014; ISBN 978-1-107-05799-9
- Johnson, D. E., & Ward, G. M. (1996). Estimates of animal methane emissions. *Environmental monitoring and assessment*, *42*, 133-141.
- Johnson, K. A., & Johnson, D. E. (1995). Methane emissions from cattle. *Journal of animal science*, *73*(8), 2483-2492.
- Johnson, K. A., Johnson D. E. 1995. Methane emissions from cattle. *J Anim Sci*, 1995; *73*: 2483-2492
- Kebreab, E., Johnson, K. A., Archibeque, S. L., Pape, D., & Wirth, T. (2008). Model for estimating enteric methane emissions from United States dairy and feedlot cattle. *Journal of animal science*, *86*(10), 2738-2748.
- Kelly, J. M., Kerrigan, B., Milligan, L. P., & McBride, B. W. (1994). Development of a mobile, open-circuit indirect calorimetry system. *Canadian Journal of Animal Science*, *74*(1), 65-71.
- Kinsman, R., Sauer, F. D., Jackson, H. A., & Wolynetz, M. S. (1995). Methane and carbon dioxide emissions from dairy cows in full lactation monitored over a six-month period. *Journal of Dairy Science*, *78*(12), 2760-2766.
- Knapp, J. R., Laur, G. L., Vadas, P. A., Weiss, W. P., & Tricarico, J. M. (2014). Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the

opportunities and impact of reducing emissions. *Journal of dairy science*, 97(6), 3231-3261.

- Lee, H. J., Lee, S. C., Kim, J. D., Oh, Y. G., Kim, B. K., Kim, C. W., & Kim, K. J. (2003). Methane production potential of feed ingredients as measured by in vitro gas test. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 16(8), 1143-1150.
- Liu, Z., & Liu, Y. (2018). Mitigation of greenhouse gas emissions from animal production. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 8(4), 627-638.
- McCaughey W, Wittenberg K, Corrigan D. Impact of pasture type on methane production by lactating beef cows. *Can J An Sc*, 1999; 79 (2): 221-226.
- McCaughey, W. P., Wittenberg, K., & Corrigan, D. (1999). Impact of pasture type on methane production by lactating beef cows. *Canadian Journal of Animal Science*, 79(2), 221-226.
- Miklos, T. (2019). *Seguridad nacional y cambio climático: Prospectiva, escenarios y estrategias*. Siglo XXI Editores México.
- Miller, W. H., & Koes, R. M. (1988). Construction and operation of an open-circuit indirect calorimetry system for small ruminants. *Journal of Animal Science*, 66(4), 1042-1047.
- Moss, A. R., Givens, D. I. and Garnsworthy, P. C. 1995. The effect of supplementing grass-silage with barley on digestibility, in-sacco degradability, rumen fermentation and methane production in sheep at low levels intake. *Anim. Feed Sci. Tech.*, 55: 9-33.
- Moss, AR, Jouany, JP y Newbold, J. (mayo de 2000). Producción de metano por los rumiantes: su contribución al calentamiento global. En *Annales de zootechnie* (vol. 49, n.º 3, págs. 231-253). EDP Sciences.
- Netz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R., & Meyer, L. A. (2007). *Climate change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers.*

- Ørskov, E. R., Flatt, W. P., & Moe, P. W. (1968). Fermentation balance approach to estimate extent of fermentation and efficiency of volatile fatty acid formation in ruminants. *Journal of Dairy Science*, 51(9), 1429-1435.
- Pérez-Barbería, F. J., Elston, D. A., Gordon, I. J., & Illius, A. W. (2004). The evolution of phylogenetic differences in the efficiency of digestion in ruminants. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 271(1543), 1081-1090.
- Petrescu, A. M. R., Peters, G. P., Janssens-Maenhout, G., Ciais, P., Tubiello, F. N., Grassi, G., ... & Dolman, A. J. (2020). European anthropogenic AFOLU greenhouse gas emissions: a review and benchmark data. *Earth System Science Data*, 12(2), 961-1001.
- Ramos Ramos, J. O. Condiciones de alimentación en ganado bovino para disminuir las emisiones de Metano en el contexto nariñense.
- Sejian, V., Lal, R., Lakritz, J., y Ezeji, T. (2011). Medición y predicción de la emisión de metano entérico. *Revista internacional de biometeorología* , 55 , 1-16.
- Sejian, V., Maurya, V. P., & Naqvi, S. M. K. (2011). Effect of thermal, nutritional and combined (thermal and nutritional) stresses on growth and reproductive performance of Malpura ewes under semi-arid tropical environment. *Journal of animal physiology and animal nutrition*, 95, 252-258.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., ... & Miller, H. L. (2007). Climate change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers.
- Van Kessel, J. A. S., & Russell, J. B. (1996). The effect of pH on ruminal methanogenesis. *FEMS microbiology ecology*, 20(4), 205-210.
- Van Lingen, H. J., Niu, M., Kebreab, E., Valadares Filho, S. C., Rooke, J. A., Duthie, C. A., ... & Hristov, A. N. (2019). Prediction of enteric methane production, yield and intensity of beef cattle using an intercontinental database. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 283, 106575.

- Van Soest, P. J. (1994). *Nutritional ecology of the ruminant*. Cornell university press.
- Vázquez Carrillo, M. F. (2022). *Estimación del aporte de energía metabolizable en bovinos f1 y desarrollo de estrategias de mitigación de emisiones de metano por fermentación entérica*. [Tesis de doctorado publicada] Universidad Nacional Autónoma De México.
- Vázquez-Carrillo, M. F., Ku-Vera, J. C., González-Ronquillo, M., Castillo-Gallegos, E., Kebreab, E., & Castelán-Ortega, O. A. (2020). Emisiones de metano por fermentación entérica de la ganadería bovina de México: La importancia de contar con inventarios nacionales precisos y de estrategias viables de mitigación. *Elementos para políticas públicas*, 4(1), 13-26.
- Vázquez-Carrillo, M. F., Montelongo-Pérez, H. D., González-Ronquillo, M., Castillo-Gallegos, E., & Castelán-Ortega, O. A. (2020). Effects of three herbs on methane emissions from beef cattle. *Animals*, 10(9), 1671.
- Velásquez, J. Á. C. *Determinación del dióxido de carbono durante la construcción de una sección del fraccionamiento Cantabria de Ciudad Obregón, Sonora* [Tesis de Ingeniería] Instituto Tecnológico de Sonora.
- Weimer, P. J. (1996). Why don't ruminal bacteria digest cellulose faster?. *Journal of dairy science*, 79(8), 1496-1502.
- Weimer, P. J. (1998). Manipulating ruminal fermentation: a microbial ecological perspective. *Journal of Animal Science*, 76(12), 3114-3122.
- Wright, A. D. G., Kennedy, P., O'Neill, C. J., Toovey, A. F., Popovski, S., Rea, S. M., ... & Klein, L. (2004). Reducing methane emissions in sheep by immunization against rumen methanogens. *Vaccine*, 22(29-30), 3976-3985.
- Yokoyama, M. T., & Johnson, K. A. (1988). Microbiología del rumen e intestino. *El Rumiante: Fisiología Digestiva y Nutrición*. CD Church (Ed.). Editorial Acribia, SA Zaragoza, España, 137-157.
- Zúñiga-González, N. (2016). Estimación de las emisiones en bovinos en los sistemas de producción lechera en pequeña escala a través del factor de conversión de metano.

