



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

**IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE TRAZADO POR HEXAFLUORURO DE
AZUFRE CON BOVINOS CRIOLLOS EN AGOSTADERO**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN INGENIERÍA AGRONÓMICA Y ZOOTECNIA

PRESENTA

RENATA PAULINA TEYSSIER RUGERIO

DIRECTOR DE TESIS

DR. EDGAR VALENCIA FRANCO

CODIRECTOR DE TESIS

DR. BERNARDINO ESPINOZA VELASCO

Tlatlauquitepec, Puebla, México, junio de 2025.



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

**IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE TRAZADO POR HEXAFLUORURO DE
AZUFRE CON BOVINOS CRIOLLOS EN AGOSTADERO**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN INGENIERÍA AGRONÓMICA Y ZOOTECNIA

PRESENTA

RENATA PAULINA TEYSSIER RUGERIO

DIRECTOR DE TESIS

DR. EDGAR VALENCIA FRANCO

CODIRECTOR DE TESIS

DR. BERNARDINO ESPINOZA VELASCO

ASESORES

DR. MARCOS PÉREZ SATO

DR. NUMA POMPILO CASTRO GONZÁLEZ

Tlatlauquitepec, Puebla, México, junio de 2025.

La presente tesis titulada: **Implementación de la técnica de trazado por hexafluoruro de azufre con bovinos criollos en agostadero** y realizada por Renata Paulina Teyssier Rugerio, ha sido revisada y aprobada por el siguiente consejo particular, para obtener el título de:

LICENCIADA EN INGENIERÍA AGRONÓMICA Y ZOOTECNIA

Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias

Consejo Particular integrado por:

Firma

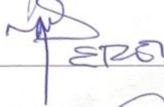
Director: Dr. Edgar Valencia Franco



Codirector: Dr. Bernardino Espinoza Velasco



Asesor: Dr. Marcos Pérez Sato



Asesor: Dr. Numa Pompilio Castro González



Tlatlauquitepec, Puebla, México, junio de 2025

El presente trabajo forma parte del Cuerpo Académico, denominado BUAP-CA-408 Manejo, Producción y Bienestar Animal y de la línea de investigación: Producción y bienestar de rumiantes y no rumiantes, financiado por recursos fiscales INIFAP con número de SIGI 11143435744.

DEDICATORIA

Dedico el siguiente trabajo a las siguientes personas

MI MAMÁ *ERIKA RUGERIO RAMOS*

Por ser mi ejemplo que seguir, por todo su apoyo y amor que me ha brindado, enseñándome que puedo lograr cualquier cosa que me proponga, ya que ella siempre estará para mí

MI HERMANA *ERIKA DANIELA TESSYSSIER RUGERIO*

Por alentarme a estudiar lo que yo quisiera, y a confiar para poder soñar en grande.

MI PADRE *OSCAR DANIEL TEYSSIER*

Por su apoyo y resiliencia a los retos de la vida.

MI TIA *LIZBETH LOPEZ RAMOS*

Por ser una de mis mejores amigas e impulsarme a experimentar nuevos caminos.

MIS AMIGOS

Por todas las experiencias y aprendizajes universitarios, además de amistades incondicionales como lo son Marilú y José.

MI FAMILIA

Por siempre estar unidos, y brindarme un apoyo incondicional en mis proyectos

AGRADECIMIENTOS

Agradezco con un enorme cariño

Dr. EDGAR VALENCIA FRANCO

Por brindarme la guía y el apoyo en esta investigación, además de ser un ejemplo como investigador y un buen amigo.

Dr. BERNARDINO ESPINOZA VELASCO

Por aceptarme en su proyecto para que esta investigación fuera posible, además del agradecimiento por recibirme y brindarme su amistad en el estado de Chihuahua.

Dra. ELIZABETH PÉREZ RUIZ

Por el apoyo incondicional y experiencias compartidas en el estado de Chihuahua.

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)

Por brindarme la oportunidad de realizar esta investigación y conocer a grandes investigadores en el proceso

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	PÁGINA
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN	v
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos específicos	3
III. HIPÓTESIS	4
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	5
4.1 Ganadería bovina en México	5
4.2 Ganadería bovina en Chihuahua	5
4.3 Bovino criollo Rarámuri en el estado de Chihuahua	6
4.4 El cambio climático y la ganadería	6
4.5 Metano	6
4.6 Inventarios GEI	7
4.7 Metano y como lo producen los bovinos	7
4.8 Diferentes técnicas que se han utilizado para la medición de metano en bovinos	9
4.8.1 Cámaras de respiración	9
4.8.2 Greenfeed	9
4.8.3 Técnicas in vitro (TPGIV)	10
4.9 La técnica SF ₆	10
V. MATERIALES Y MÉTODOS	12
5.1. Localización del sitio experimental	12
5.2. Unidad y manejo preexperimental	12
5.3. Manejo experimental	12
5.3.1 Colocado de muestreadores	12
5.3.2 Monitoreo de bovinos en agostadero	13
5.3.3 Remoción de los muestreadores	13
5.5. Variables evaluadas	13

5.5.1 Tasa de liberación de las cápsulas de SF ₆	13
5.5.2 Ajuste y evaluación de eficiencia en el diseño de las gamarras	14
5.5.3 Tasa de flujo de aire en los RI	14
5.5.4 Estimación de las emisiones individuales de metano en bovinos	15
5.5.5 Análisis estadístico	15
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
6.1 Tasa de liberación de las cápsulas de SF ₆	16
6.2 Ajuste y evaluación de eficiencia en el diseño de las gamarras	17
6.3 Tasa de flujo de aire en los RI	18
6.4 Estimación de las emisiones individuales de metano en bovinos	19
VII. CONCLUSIÓN	22
VIII. REVISIÓN DE LITERATURA.....	23

ÍNDICE DE CUADROS

Contenido	Páginas
Cuadro 1. Clasificación de la eficiencia de gamarras.	17
Cuadro 2. Determinación de rangos en la calibración de los RI para periodos de 72 horas.	18
Cuadro 3. Coeficiente de correlación de las variables evaluadas y las emisiones de CH ₄	20
Cuadro 4. Valores promedios estimados para las variables evaluadas.	21

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Páginas
Figura 1. Inventario nacional de emisiones de gases INEGYCEI 2020-2021.	7
Figura 2. Proceso de producción de CH ₄ en los rumiantes	8
Figura 3. Formula para la determinación de emisiones de CH ₄ en gramos	11
Figura 4. Tasa de liberación de SF ₆ obtenida en la calibración de las cápsulas intraruminales. Cápsulas seleccionadas que tuvieron un r^2 igual o mayor a 0.99	16
Figura 5. Concentraciones individuales de CH ₄ en partes por millón (ppm)	19
Figura 6. Concentraciones individuales de SF ₆ reportadas en partes por trillón.....	19

RESUMEN

La ganadería extensiva representa una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero, en particular de metano entérico, lo que contribuye significativamente al cambio climático. Este estudio tuvo como objetivo la implementación de la técnica de trazado de hexafluoruro de azufre (SF_6) con bovinos criollos en condiciones de agostadero en el estado de Chihuahua, México. El experimento se realizó en un potrero de 50 hectáreas con nueve vacas criollas (peso promedio de 300 kg), que se sometieron por una etapa de adaptación y manejo preexperimental. Se calibraron cápsulas de SF_6 por pérdida de peso y se obtuvo la variable tasa de liberación a través de regresión lineal. Asimismo, se evaluó el desempeño del prototipo de gamarra para periodos de 72 horas, observándose que el 52 % de estas permanecieron funcionales, por otro lado, un 19 % presentó desgaste, que no comprometen el sistema de muestreo, mientras que el 30 % restante sufrió daños significativos, como pérdida total del dispositivo. En cuanto a la evaluación de los restrictores de ingreso (RI), estos fueron calibrados según la tasa de flujo de aire, resultando que el 75 % se ubicó dentro del rango óptimo de 0.106 a 0.116 mL min^{-1} . Sin embargo, las condiciones del agostadero, caracterizado por la presencia de arbustivas, pudieron haber influido negativamente en la eficiencia del sistema de captura de gases. Para el análisis entre las concentraciones de CH_4 , SF_6 , así como las emisiones individuales de CH_4 , se aplicó un análisis de correlación de Pearson. Los resultados mostraron emisiones de CH_4 que oscilaron entre 106.91 y 293.75 g día^{-1} . Se destaca que un problema frecuente es la eficiencia de la gamarra por la ruptura o pérdida de la misma, lo que influye en la obtención y variabilidad de los resultados.

Palabras clave: *Bos taurus*, SF_6 , Metano, Emisiones, Ganadería, Gamarra

ABSTRACT

Extensive livestock production represents an important source of greenhouse gas emissions, particularly enteric methane, which contributes significantly to climate change. The objective of this study was to implement the sulfur hexafluoride (SF₆) tracer technique in criollo cattle under rangeland conditions in the state of Chihuahua, Mexico. The experiment was conducted in a 50-hectare paddock using nine criollo cows with an average body weight of 300 kg, which were subjected to a pre-experimental adaptation and management period.

SF₆ permeation tubes were calibrated using the weight loss method, and the release rate was estimated through linear regression. In addition, the performance of the halter prototype was evaluated during 72-hour sampling periods. Results indicated that 52% of the halters remained functional, while 19% showed wear that did not compromise the sampling system; however, the remaining 30% experienced significant damage, including complete loss of the device.

Regarding the evaluation of the intake restrictors (IR), these were calibrated according to airflow rate, with 75% falling within the optimal range of 0.106 to 0.116 mL min⁻¹. Nevertheless, rangeland conditions characterized by the presence of shrub vegetation may have negatively affected the efficiency of the gas capture system. Pearson correlation analysis was applied to examine the relationships among CH₄ and SF₆ concentrations and individual CH₄ emissions. Methane emissions ranged from 106.91 to 293.75 g day⁻¹. A recurring issue identified was the efficiency of the halter system due to breakage or loss, which influenced data collection and contributed to variability in the results.

Keywords: *Bos taurus*, SF₆, Methane, Emissions, Livestock, Criollo Cattle

I. INTRODUCCIÓN

La ganadería es una industria que ha crecido exponencialmente a nivel mundial, contribuye con una parte importante de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) antropogénicas, que además, impacta en el ambiente, ya que el uso de los recursos como el aire, el suelo, el agua y la biodiversidad son indispensables para esta (Gerber *et al.*, 2013). Esto genera aumentos desproporcionados de la temperatura ambiental, afectando el equilibrio en los ecosistemas (IEECC, 2020). Por lo que este fenómeno se ha convertido en uno de los principales preocupaciones de siglo XXI.

La relación entre el metano (CH_4) con la producción de ganado bovino con propósitos cárnicos y lecheros, de acuerdo con la, son responsables de la mayoría de las emisiones, pues contribuye con el 41 % y el 29 % de las emisiones del sector ganadero bovino respectivamente (Gerber *et al.*, 2013). El CH_4 se produce en los rumiantes a través de un proceso complejo llamado digestión fermentativa (Church, 1993), cuya principal función es la producción de energía, expulsando subproductos de esta fermentación en forma de eructos que contienen CH_4 (Bonilla y Lemus, 2012). La cantidad de CH_4 emitido por los bovinos incrementa, cuando la dieta consumida es alta en fibra (Aguiar y Rojas, 2014).

Ante la problemática ambiental asociada a la ganadería, se han desarrollado diferentes técnicas para el sector ganadero, que buscan cuantificar las emisiones entéricas de CH_4 y así implementar estrategias para reducirlas. Sin embargo, no existe un método universalmente superior para cuantificar el CH_4 de los animales. Algunos métodos son más apropiados para condiciones a pequeña escala, otras a gran escala (Tedeschi *et al.*, 2022). Entre las metodologías empleadas están las cámaras de respiración (Johnson y Johnson, 1995), técnicas *in vitro* (Crosby y Ramírez, 2018) y algunas recientes como el Greenfeed (Hristov *et al.*, 2015). Sin embargo, estas técnicas han sido enfocadas principalmente hacia sistemas de producción en confinamiento, de manera individual creando ambientes artificiales, y presentan limitaciones para su aplicación a bovinos en pastoreo. Como alternativa se ha desarrollado la técnica de trazado con hexafluoruro de azufre (SF_6) que permite cuantificar las emisiones de CH_4 en bovinos en pastoreo.

Al respecto, el norte de México se caracteriza por tener sistemas de producción en agostadero, manejando principalmente bovinos de razas europeas, cuyo objetivo principal es la exportación

de becerros a Estados Unidos. Sin embargo, estas razas presentan problemas de adaptación a los desafíos emergentes (disminución de capacidad de carga de agostaderos y enfermedades emergentes) y al cambio climático para la producción de carne (Armstrong *et al.*, 2022). En este sentido, las razas de ganado criollo o locales, por medio de selección natural y antropogénica se han adaptado a condiciones extremas, como las regiones áridas y semiáridas con temperaturas extremas y baja disponibilidad de recursos forrajeros e hídricos (Márquez *et al.*, 2024). En el estado de Chihuahua existe el ganado Criollo Rarámuri, una raza que recientemente ha experimentado un crecimiento significativo, debido a su reconocimiento como un componente clave en la implementación de prácticas ganaderas sustentables (Matthew *et al.* 2023). Por lo que, la caracterización de su respuesta de adaptación, productivas y emisiones de CH₄ son indispensables para su incorporación en los sistemas de producción.

Por lo tanto, en esta investigación, se propuso monitorear las emisiones de CH₄ en bovinos criollos en condiciones de agostadero, implementando y ajustando la técnica de trazado de hexafluoruro de azufre (SF₆), para la cuantificación diaria de CH₄ emitidos por esta raza de bovinos.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Implementar la técnica de trazado de hexafluoruro de azufre (SF_6) para la estimación de emisiones de metano entérico en bovinos criollos en condiciones de agostadero.

2.2 Objetivos específicos

- Calibrar y estandarizar de la tasa liberación controlada de SF_6 en cápsulas intraruminales.
- Ajustar y evaluar la eficiencia de gamarras utilizadas en la técnica de SF_6 para el muestreo de metano en bovinos criollos en agostadero.
- Determinar dos rangos de valores en la calibración de restrictores de ingreso para periodos de 72 horas utilizando un flujómetro másico.
- Estimar las emisiones individuales de metano entérico en bovinos criollos a través de técnica de trazado de hexafluoruro de azufre.

III. HIPÓTESIS

Las modificaciones a la técnica SF₆ en bovinos criollos en condiciones de agostadero podrán reducir la variabilidad en la medición de las emisiones individuales de metano.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Ganadería bovina en México

En México la ganadería bovina es clave para la seguridad alimentaria y la economía de país, con un censo 8, 803, 625 cabezas de ganado, en las que destacan estados como Veracruz, Jalisco, Durango y Chihuahua (SIAP, 2023). Esta actividad es basada en el manejo extensivo con un enfoque económico, dependiente de tecnologías externas, deforestación a causa de los pastizales, contaminación por agroquímicos y erosión del suelo, demostrando su insostenibilidad (Palma, 2014). Sin embargo, la ganadería ha desarrollado una relación con el incremento de población nacional, esto se ve reflejado en el aumento de las cabezas de ganado en un 5.3 % en el periodo del 2007 al 2022, y el incremento poblacional con la finalidad de abastecer los requerimientos alimenticios de la población (INEGI, 2023).

4.2 Ganadería bovina en Chihuahua

En el 2022 el estado registró un censo de 1,746,817 cabezas de ganado bovino (INEGI, 2023), se considera un estado clave en el sector ganadero del país. Chihuahua es el principal estado exportador de becerros, clasificado por el departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA) en región “A”, condición que le permite la exportación de ganado a los Estados Unidos. La ganadería en el estado se desarrolla de manera tradicional en agostaderos, creando varios retos a nivel climático, fisiográfico y de erosión. En lo que respecta al estatus sanitario del estado, ésta clasificado en función al número de casos nuevos presentes en una población y de casos preexistentes de tuberculosis bovina, que en el caso de exportaciones es indispensable una prueba negativa de tuberculina en los animales que conforman el lote para exportar (CEFPP, 2024).

4.3 Bovino criollo Rarámuri en el estado de Chihuahua

El bovino criollo Rarámuri es un biotipo de *Bos Taurus*, procedente de la zona sur de las Barrancas del Cobre, que cuenta con más 500 años de selección natural, desarrollándose en zonas desérticas y montañosas, en las que diferentes razas de bovinos especializados no han podido sobrevivir (Hernandez, 2001). Estos bovinos poseen características favorables para una producción ganadera rentable y sostenible, mejorando la salud alimentaria, reduciendo la presencia de residuos químicos usados para el control de parásitos y enfermedades. Esta raza se distingue por recorrer mayores distancias, obteniendo un mayor aprovechamiento de la baja calidad de forraje y escasez hídrica, mostrando una mayor tolerancia al estrés clórico, todo ello sin afectar su ganancia de peso ni su condición corporal (Núñez *et al.*, 2016)

4.4 El cambio climático y la ganadería

El sector ganadero contribuye en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), proceso en el que se retiene la radiación emitida por la atmósfera, absorbiendo principalmente gases como el dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) y metano (CH₄) de forma natural o antropogénica (CEPSA, 2015). la emisión continua GEI provoca el calentamiento de la superficie terrestre, desencadenando el cambio climático que resulta en alteraciones en los ciclos naturales (IPCC, 2019). La relación de este sector con el cambio climático es la producción de carne y leche bovina que contribuye con el 41 % y 29 % de las emisiones producidas, afectando los sistemas de producción, causando pérdidas de nitrógeno (N), energía y materia orgánica, que merman la productividad. Por lo que en este sector mediante la implementación de diferentes estrategias en la cadena productiva se puede contribuir de manera significativa en la mitigación de estos gases (Gerber *et al.*, 2013)

4.5 Metano

El metano es un gas incoloro, principal componente del gas natural y encargado de la oxidación de la tropósfera, la principal fuente del metano es la descomposición de la materia orgánica en los sistemas biológicos, que, en la actualidad, se ha convertido en actividades como, tratamiento de aguas residuales, agricultura, ganadería y la quema de combustibles, que representan un 60 % provocado por las actividades humanas y actualmente es responsable del calentamiento global (NASA, 2025).

4.6 Inventarios GEI

El inventario (Figura 1) es un instrumento que permite conocer las emisiones de GEI de un lugar determinado, que se originan por las actividades humanas como la energía, la industria, los residuos y la agricultura, ya sea a nivel mundial, nacional o estatal. Es fundamental para diseñar las políticas de reducción de emisiones, entendiendo las principales fuentes y el papel que juegan los ecosistemas que capturan parte de estas emisiones (INECC, 2018).

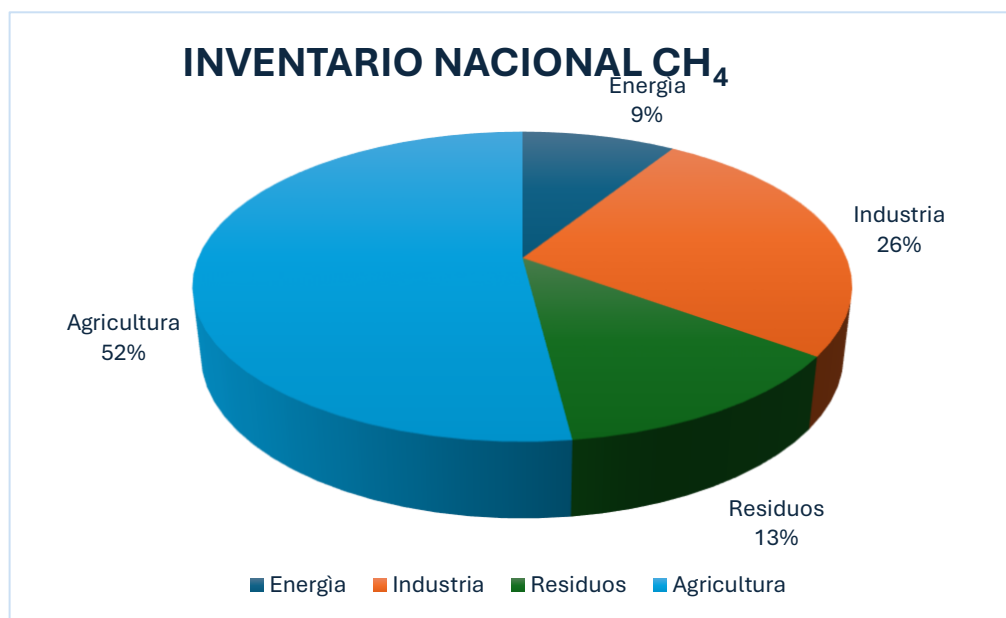


Figura 1. Inventario nacional de emisiones de gases INEGYCEI 2020-2021.

4.7 Metano y como lo producen los bovinos

El principal GEI relacionado con la ganadería de manera directa es el CH₄, la producción del CH₄ en bovinos se inicia a partir de un proceso llamado fermentación ruminal, la cual se lleva a cabo principalmente en el rumen 87 % y tracto posterior 13 % (Carmona, 2005), dependiendo el alimento consumido que permanece de 20-25 horas en rumen, en el cual los microorganismos hidrolizan la celulosa, liberando glucosa e iniciando la fermentación ruminal, con la finalidad de producir ácidos grasos volátiles (AGV's) que son el acético con 60mM, propiónico 20mM y butírico 10 mM que son considerados los niveles estables de AGV's en el rumen, convirtiéndose finalmente en energía, por medio de la oxidación (Church, 1943). Sin embargo, los subproductos

de esta fermentación causada principalmente por las arqueas son gases como el CH_4 y el CO_2 , que son liberados por el bovino, en mayor medida a través de los eructos (Figura 2) (Bonilla y Lemus, 2012).

La producción de CH_4 en bovinos es influenciado por la digestibilidad de manera que la producción de este gas aumenta con la fermentación de la fibra (celulosa), mientras que la fermentación de almidón (granos) disminuye los microorganismos metanogénicos (Aguilar y Rojas, 2014), esto sucede ya que la fermentación de la fibra tiene una alta concentración de bacterias celulolíticas y sacarolíticas, que durante la digestión producen un alto contenido de ácido acético elevándose a un 60-75 %, mientras que en la fermentación del almidón las concentraciones de bacterias son principalmente amilolíticas, que producen una mayor concentración de ácido propiónico 15-19 %, que a su vez aumentan la producción de ácido láctico modificando el pH ruminal (Church, 1993) .

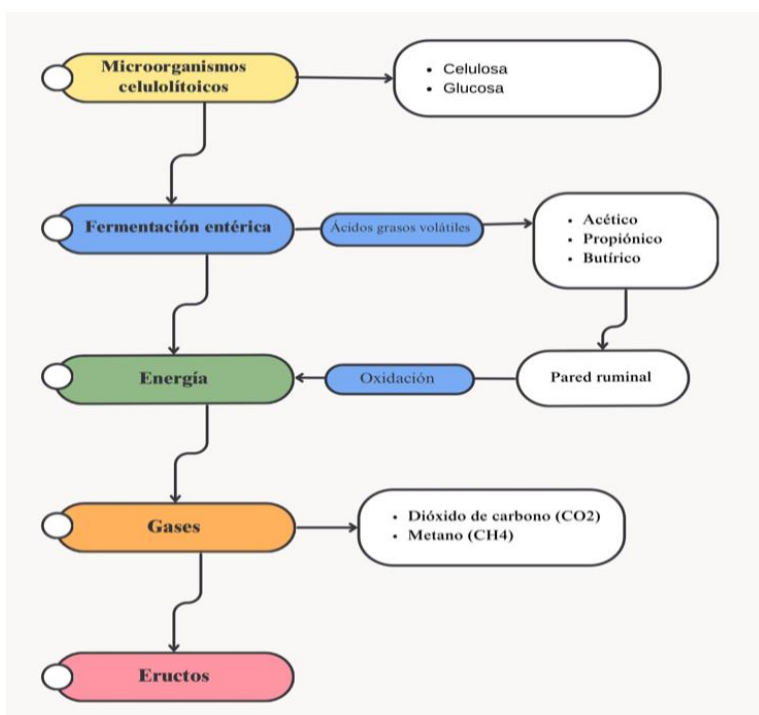


Figura 2. Proceso de producción de CH_4 en los rumiantes

4.8 Diferentes técnicas que se han utilizado para la medición de metano en bovinos

Actualmente las emisiones de GEI se han vuelto una problemática mundial, por consecuencia, se han desarrollado diferentes técnicas para el sector ganadero en la emisión de CH₄.

4.8.1 Cámaras de respiración

Originalmente fueron creadas para la medición de requerimientos energéticos de los animales por medio de la calorimetría, actualmente, son utilizadas para la medición de gases como el CH₄, el CO₂ y el consumo de O₂ en los animales. Estas cámaras son hechas de poliuretano recubiertas de acero, con laterales de cristal para facilitar la observación, además de un comedero que registra automáticamente el consumo del alimento y agua. Su funcionamiento se basa en la regulación de temperatura, humedad relativa y flujo de aire, en el cual su sistema de almacenamiento captura los datos muestreados de gas cada 6 min, teniendo estos datos, estas cámaras permiten conocer la cantidad de gases en un determinado tiempo, mediante la diferencia de concentraciones de gases de entrada y de salida, permitiendo muestreos individuales de cada animal (Jaurena *et al.*, 2019). Sin embargo, esta técnica requiere una gran inversión económica y no toma en cuenta los diferentes sistemas de producción y el manejo que se le da al ganado, ya que crea un ambiente artificial en el área de muestreo (Johnson y Johnson, 1995).

4.8.2 Greenfeed

Es un sistema de monitoreo individual que determina las concentraciones de CO₂ y CH₄ por medio de un sistema que libera alimento con lo que atrae al bovino y lo mantiene en una posición, muestreado los gases producidos por el bovino, estos sistemas están diseñados para estar de manera accesible para los bovinos de manera aleatoria, haciéndolo funcional en sistemas estabulados. A pesar de su funcionalidad, las mediciones de las emisiones individuales son puntuales, sólo cuando los animales se acercan a comer, además, con solo proporcionar alimento concentrado en el comedero puede generar diferencias en las mediciones de CH₄, aunado a esto, la inversión que se requiere para obtener y dar mantenimiento al equipo es alta (Hristov *et al.*, 2015).

4.8.3 Técnicas in vitro (TPGIV)

Consiste en simular las condiciones de rumen (pH, ambiente anaeróbico y temperatura), con la finalidad de evaluar la fermentación que aportan los minerales, sustratos o aditivos que ingeridos previamente por el bovino, creando dos métodos el primero es el GIV directo que determina el CH₄ por medio de un cromatógrafo y el indirecto en donde se inyecta un gas con una solución de NaOH, de ambas formas se necesita la colecta de líquido ruminal fresco, sea obtenido por medio de una cánula ruminal o sonda gástrica, sus principales ventajas es la rapidez de los resultados y su asequibilidad, sin embargo esta técnica solo se basa en una simulación del rumen, y no es posible su análisis a periodos de más de 96 horas (Crosby y Ramírez, 2018).

4.9 La técnica SF₆

La técnica de trazado de hexafluoruro de azufre fue creada por Johnson en 1994, permite la cuantificación diaria de CH₄ por animal, en sistemas de pastoreo, sin afectar o limitar los movimientos y hábitos de pastura del hato. Esta técnica es conocida como SF₆ por ser considerado el mejor trazador para medir metano en rumiantes, debido a su estabilidad en el rumen, no ser tóxico para el animal y sus concentraciones en el ambiente son muy bajas (INIA, 2022).

La técnica SF₆ se compone de tres componentes esenciales:

- Un tubo o cápsula permeable que contiene SF₆ que se deposita en el rumen.
- Un regulador de flujo o restrictor de ingreso (RI) ubicado cerca de los ollares del rumiante
- Uno o dos tubos colectores, que se conectan a los RI. Ambos, RI y tubos colectores se montan en una gamarra sobre la cabeza del animal.

La determinación de las emisiones de CH₄, son analizadas por medio de un cromatógrafo de gases por columnas, que se expresan en partes por millón al analizar CH₄ y partes por trillón en el gas trazador SF₆, el gas trazador es previamente calibrado obteniendo una tasa de liberación (TLSF₆) conocida.

Las emisiones individuales de CH_4 se estima tomando en cuenta la $TLSF_6$ de la cápsula intraruminal, las concentraciones de reportadas con el cromatógrafo y las concentraciones ambientales (BG) de estos gases. Las emisiones de CH_4 se reportan en gramos, por medio de la siguiente fórmula (Figura 3) (López *et al.*, 2022)

$$CH_4 (g / d) = TLSF_6 * \frac{(CH_4 - BG_{CH_4})}{(SF_6 - BG_{SF_6})}$$

Figura 3. Formula para la determinación de emisiones de CH_4 en gramos

Una de sus principales ventajas de esta técnica es que puede ser utilizada en condiciones de pastoreo y se obtienen datos individuales de cada bovino, sin embargo, se sobreestiman las emisiones de CO_2 y las emisiones pueden ser muy variables a comparación con técnicas como las cámaras de respiración (Bonilla y Lemus, 2012). Pero permite obtener datos de emisiones de animales en condiciones de pastoreo y sobre todo en razas bovinas que presentan hábitos de alimentación y movilidad en grandes extensiones de terreno como los bovinos criollos.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Localización del sitio experimental

El presente estudio se realizó en el Campo Experimental “La Campana” del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en el km 80 de la carretera Chihuahua-Ciudad Juárez situado a 29° 26’ latitud Norte de y 106 ° 39’ longitud Oeste, en el municipio de Chihuahua, Chihuahua. La región presenta temperaturas promedio de 33.7 °C y mínima de 0.6 °C, con una precipitación media anual de 119.5 mm (INECC, 2018).

5.2. Unidad y manejo preexperimental

En 14 días previo al inicio del experimento, se realizó el pesaje y el desparasitado de los bovinos para seleccionar y la homogenizar el lote experimental. Una vez seleccionados los animales, a 9 vacas se les colocó en el rumen una cápsula de liberación controlada de SF₆, esto con la ayuda de un tirabolos. Posterior a la colocación de las cápsulas trazadoras de SF₆, 5 días previos a los muestreos, se llevó a cabo el proceso de adaptación y ajuste de las gamarras en los animales.

El estudio se realizó de junio a noviembre de 2024, se llevaron a cabo 4 muestreos de 72 horas en ese periodo. Se muestrearon 9 vacas criollas Rarámuris con un peso promedio de 300 kg, y un rango de edad de entre 5 y 7 años, en edad reproductiva. El área experimental fue un potrero de 50 ha, con pastizal amacollado abierto de *Bouteloua-Aristida*, asociado con encinos e invadido por zacate africano (*Eragrostis lehmanniana*), los animales permanecieron en el área durante los muestreos.

5.3. Manejo experimental

Los animales fueron ingresados a los corrales de manejo, para su posterior ingreso en la manga con la finalidad inmovilizarlos en el brete. Simultáneamente se tenía preparado la mesa de trabajo con los componentes del sistema del muestreo de CH₄ (gamarras, tubos colectores y RI).

5.3.1 Colocado de muestreadores

Se comenzó con la colocación de la gamarra siguiendo todas sus, posteriormente se colocó un RI cerca de cada una de las fosas nasales del bovino, asegurándolo con cinchos de nylon (si

es necesario con hilo y aguja), para finalmente realizar la conexión de RI con su respectivo tubo colector.

Por cada animal, se registró la hora en la que se realizó la conexión del RI con su colector y posteriormente, los animales fueron guiados al potrero experimental. para la muestra ambiental también se registró la hora de conexión y se dejó en un área lejos de alguna fuente emisora de CH₄.

5.3.2 Monitoreo de bovinos en agostadero

Una vez que los animales se liberaron en el potrero, se inició con el monitoreo de las vacas durante las 72 horas de muestreo durante los 4 periodos, el monitoreo se hizo con la ayuda de binoculares. Se registró y se aseguró que los componentes de la técnica (tubos colectores y RI), junto con la gamarra, no fueran extraviados o en su defecto desconectados, y que, además, los componentes de la técnica, no afectara su comportamiento diario (pastoreo).

5.3.3 Remoción de los muestreadores

Una vez transcurrida las 72 horas, en cada muestreo previo al retiro de los componentes con los animales aún en el potrero se hizo un último monitoreo, con la finalidad de identificar que los componentes de la técnica sigan colocados correctamente, esto previo a la movilización de los animales al corral de manejo. Así, los animales se trasladaron a la manga de manejo, se inmovilizaron en el brete, en donde se realizó el pesaje y se desconectaron cada RI con su tubo colector, inmediatamente después de desconectar los componentes en los animales, se hizo el mismo procedimiento con el muestreador ambiental. El peso y la hora de desconexión de los componentes se registró en la bitácora de campo.

5.5. Variables evaluadas

5.5.1 Tasa de liberación de las cápsulas de SF₆

Se llevó a cabo el ensamble de las cápsulas intraruminales de liberación controlada de SF₆. Los componentes de las cápsulas son una tuerca de latón hembra de 1/2 de pulgada de la marca Swagelok, un fritz de acero inoxidable de 1/2 de pulgada de diámetro con un tamaño de poro de 2 μ de la marca Phenomex ®, una lámina virgen de politetrafluoroetileno (PTFE) de diámetro 1/2 de pulgada de la marca Zektor ®, una arandela de nylon de 1/2 pulgada de diámetro y un tubo

de latón de 4.5 cm de largo y diámetro de ½ pulgada. El llenado de las cápsulas con SF₆ se hizo con nitrógeno líquido como lo describe López *et al.* (2022). Cada cápsula se llenó en promedio con 1.5 g de SF₆, una vez llenados se ensamblaron y se procedió a su calibración una vez transcurridos 24 horas después del llenado.

La calibración se llevó a cabo con un baño maría con agitación manteniendo la temperatura constante a 39 °C durante 5 semanas. Cada 7 días se registró el peso de las cápsulas con la ayuda de una balanza analítica (Balanza analítica compacta 252 GR, A & D Company, Ltd). Para determinar la variable tasa de liberación (mg día⁻¹) de SF₆ se graficó la pérdida de peso de las cápsulas (pérdida vs tiempo) y se llevó a cabo una regresión lineal, las cápsulas que tuvieron un coeficiente de determinación (r²) igual o mayor a 0.98 se seleccionaron para la llevar a cabo el ensayo.

5.5.2 Ajuste y evaluación de eficiencia en el diseño de las gamarras

Esta variable se desarrolló con base a la resistencia y calidad de los materiales del prototipo de la gamarra para la técnica SF₆. Se tomaron en cuenta cuatro muestreos, cada uno de 72 horas, los cuales se clasificaron en completas, desgastadas y rotas. Y con base a la clasificación, la eficacia que tuvieron las gamarras y la integridad de los componentes de esta, se clasificaron en completas, sin ningún tipo de desprendimiento o ruptura, en la categoría desgastadas, se tomaron en cuenta, las aberturas que se generaban en los porta colectores, mientras que, en la categoría de rotas, se tomó en cuenta el desprendimiento de cualquier parte del equipo y de las tiras de la gamarra, descosturas e incluso la pérdida de la gamarra.

5.5.3 Tasa de flujo de aire en los RI

Previo a la calibración de los RI, se aseguró que no tuvieran fugas los tubos colectores, inyectando aire a 80 psi y se sumergió en una cubeta de 20 L con agua para detectar áreas con burbujas, posteriormente, se le aplicó vacío a 0.48 mmbar por medio de una bomba de vacío y se verificó el vacío con la ayuda de un vacuómetro digital (Fieldpiece®).

La calibración de los RI fue a través de la variable Tasa de flujo de aire. El flujo óptimo que se buscó fue de 0.116 mL min⁻¹, para lograr este flujo se usó un flujómetro digital (AALBORG DPM07), calibrado previamente por el fabricante para medir flujo de aire en un rango de 0.001-0.5000 ml min⁻¹. Para la calibración de los RI se establecieron dos rangos, el primero 0.106 a 0.116 mL min⁻¹ y el segundo de 0.117 a 0.126 mL min⁻¹, estos datos fueron registrados durante

la calibración del RI antes de cada muestreo. La tasa de flujo se obtuvo mediante la fórmula $C = (V/p) * (\Delta p / \Delta T)$ desarrollada por Gere (2012), en la cual C es el ajuste de entrada de aire de cada restrictor, el volumen de cada colector es 0.5 L (V) y según período de colección de gas (72 horas) en los que se muestreo el aliento de los bovinos.

5.5.4 Estimación de las emisiones individuales de CH₄ en bovinos

Esta variable se midió con la obtención de datos individuales de CH₄, de cada bovino y de la muestra ambiental de cada uno de los muestreos realizados durante las mismas 72 horas, por medio de la técnica SF₆ (tubos colectores y RI), y analizados por medio de un cromatógrafo de gases (Shimatzu Modelo GC-2014 Greenhouse gas Analyzer) equipado con un detector de captura de electrones y una fuente de radiación ⁶³Ni que opera a una temperatura inicial de 35°C, en partes por millón para CH₄ y parte por trillón para SF₆. Finalmente se calculó las emisiones individuales de los bovinos mediante una ecuación (Figura 3). En donde TLSF₆ es la tasa de liberación (mg día⁻¹) de la cápsula de cada vaca; (CH₄ – BG_{CH₄}) es la diferencia entre la concentración de metano obtenido del aliento de la vaca menos la concentración de CH₄ de la muestra ambiental; (SF₆ – BG_{SF₆}) es la diferencia entre la concentración de SF₆ obtenido del aliento de la vaca menos la concentración de SF₆ de la muestra ambiental.

5.5.5 Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados por medio del paquete estadístico Statistic Analysis System (SAS versión 2003). Para la tasa de liberación de SF₆, a cada cápsula calibrada se le realizó una regresión lineal con los datos obtenidos de pérdida de peso durante la calibración para obtener la r² y la pendiente de la curva (equivalente a la tasa de liberación de SF₆) generada. Se realizó un análisis de correlación de Pearson de las variables de emisiones de CH₄ y SF₆ evaluadas con el procedimiento PROC CORR.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Tasa de liberación de las cápsulas de SF₆

En la figura 4 se presentan los datos de tasa de liberación en mg d⁻¹ de las cápsulas intraruminales de liberación controlada de SF₆. Del lote inicial de 30 cápsulas evaluadas, solamente 9 de tuvieron la tasa de liberación adecuada (de 2.56 a 4.73 mg d⁻¹) y una r² (mayor a 0.98) para estimar las emisiones CH₄ en bovinos. De acuerdo a la metodología descrita por Moscoso *et al.* (2107), el coeficiente de determinación (r²) que obtuvieron fue de 0.99 y la tasa de permeación conocida fue de 2.53 mg día⁻¹ con una carga inicial de 2.12 g.

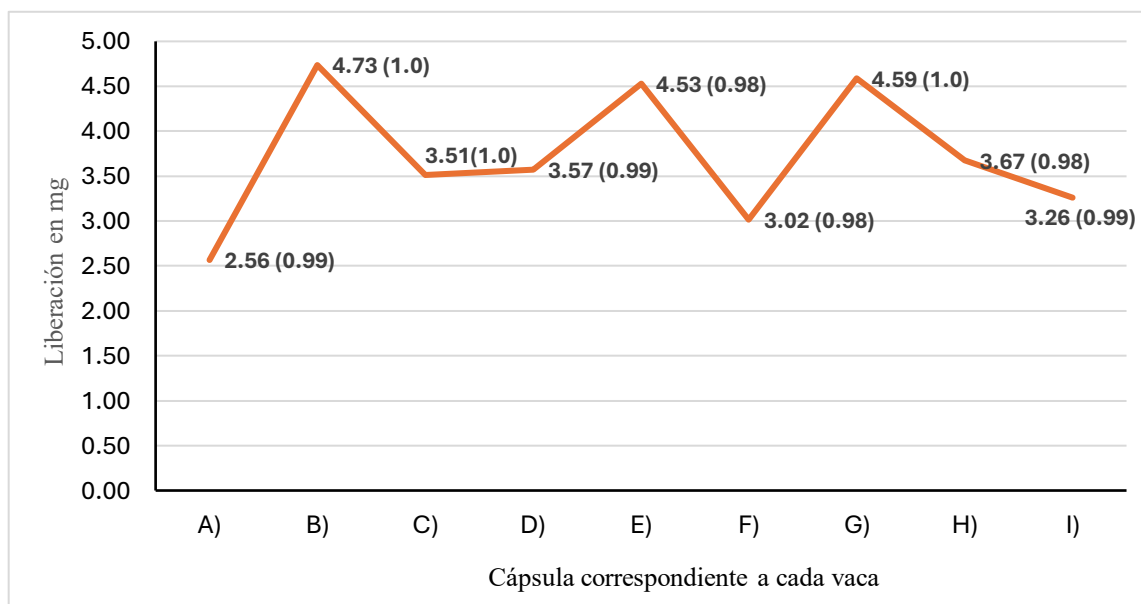


Figura 4. Tasa de liberación de SF₆ obtenida en la calibración de las cápsulas intraruminales. Cápsulas seleccionadas que tuvieron un r² igual o mayor a 0.99

Por otra parte, Sánchez *et al.* (2021) en un estudio llevado a cabo con bovinos tuvieron una tasa de liberación promedio de 5.44 ± 0.9 mg d⁻¹ con una r² de 0.99, estos valores son mayores a los reportado en el presente trabajo. Pinares *et al.* (2008) estimaron las emisiones de CH₄ en vacas en pastoreo con rangos de permeación entre 2.214 y 5.689 mg d⁻¹, lo cual no representó dificultades al momento de hacer las estimaciones. En este sentido, las tasas de permeación que se obtuvieron en este estudio fueron las adecuadas ya que entran en los rangos típicos de estimación de metano en bovinos.

6.2 Ajuste y evaluación de eficiencia en el diseño de las gamarras

En cuanto a la resistencia y calidad de los materiales del prototipo de la gamarra utilizada en la técnica SF₆, en el cuadro 1 se describen los resultados de la evaluación. Durante el periodo experimental (72 h), las gamarras que se mantuvieron intactas hasta el final del muestreo fueron 52 %, es decir, no sufrieron daño los materiales y componentes de muestreo (RI, tubos colectores). Un porcentaje menor 19 % presentaron daños en los materiales de las gamarras, pero sin pérdidas o desconexiones en los componentes de muestreo, y finalmente el 30 % de las gamarras presentaron daños significativos (ruptura de gamarra o desconexión de componentes) o incluso pérdida completa de la gamarra y componentes de muestreo.

Cuadro 1. Clasificación de la eficiencia de gamarras.

Clasificación de gamarras	Resultados
	(%)
Completas	52
Desgastadas	19
Rotas	30

En estudios previos (Pinares *et al.*, 2008; Sánchez *et al.*, 2021), ninguno de los autores especifica el tipo de gamarra o sistema en los que están sujetos los componentes de muestreo del aliento de los rumiantes. En general, en los trabajos que se han hecho con la técnica SF₆, el muestreo se efectuó en función a la experiencia del personal que maneja los animales, llevadas en condiciones de confinamiento, pequeñas praderas y principalmente con animales con tiempos de adaptación prolongado en donde influye también el temperamento propio de las razas usadas (Moate *et al.*, 2021).

La técnica de SF₆ presenta la ventaja de muestrear el aliento de los animales por periodos prolongados (hasta 10 días continuos), sin embargo, no es recomendable extender los muestreos, debido a mayor posibilidad de errores provocados a factores ambientales (clima) y por errores

humanos (Pinares *et al.*, 2008), bajo condiciones de agostadero, debido a factores como los hábitos de pastoreo y la movilidad que presentan los bovinos criollos en comparación con las razas europeas (Núñez *et al.*, 2016).

6.3 Tasa de flujo de aire en los RI

La calibración de los restrictores de ingreso (RI) fue a través de la Tasa de flujo de aire. Los porcentajes de RI que entraron dentro de la calibración del rango de 0.106 a 0.116 mL min⁻¹ fueron del 75 y los restantes con una calibración en el rango de 0.117 a 0.126 mL min⁻¹ (Cuadro 2). El flujo calculado para poder llenar los tubos colectores en un periodo de 72 horas (presión interna de 0.48 mBar a 500 mBar) fue de 0.116 mL min⁻¹. Los flujos que se manejan tradicionalmente están diseñados para periodos de 5 días o incluso 10, pero en este trabajo el periodo de muestreo se determinó a 72 horas debido a las condiciones en que los animales estaban pastoreando (agostadero con presencia de arbustivas como gatuño) que favorecerían un menor porcentaje de eficiencia del sistema de colección de aliento.

Cuadro 2. Determinación de rangos en la calibración de los RI para periodos de 72 horas.

Calibración de RI por dos rangos	Resultados (%)
1 (0.106 a 0.116 mL min ⁻¹)	75
2 (0.117 a 0.126 mL min ⁻¹)	25

Los resultados de concentraciones de CH₄ en ppm y SF₆ en ppt de las muestras de aliento obtenidas en las vacas se muestran en las figuras 5 y 6 respectivamente. Los resultados presentados corresponden a los muestreos individuales en cada uno de los 4 muestreos. En algunos muestreos algunas vacas no se presentan los resultados de las concentraciones de CH₄ y SF₆ debido a que, durante el periodo de muestreo, la eficiencia de las gamarras fueron variables (Cuadro 1).

6.4 Estimación de las emisiones individuales de metano en bovinos

La técnica SF_6 nos permite estimar las emisiones de CH_4 de manera individual en los bovinos criollos Rarámuri, en la figura 5 se graficaron las concentraciones individuales en ppm del metano emitido en cada muestreo. Se observa que hay variabilidad durante los cuatro muestreos.

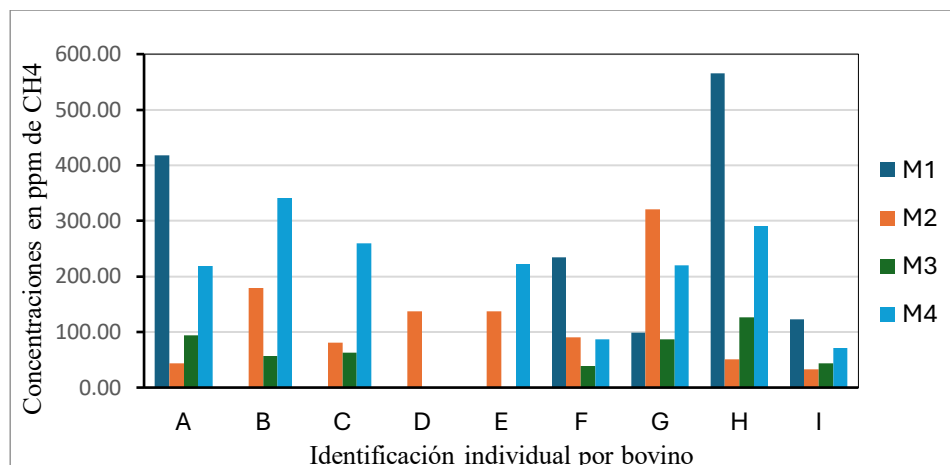


Figura 5.Concentraciones individuales de CH_4 en partes por millón (ppm), donde M1 indica el primer muestreo, M2 el segundo muestreo, M3 el tercer muestrero y M4 cuarto muestreo

Con respecto a la concentración de SF_6 utilizado como gas trazador durante los cuatro muestreos la media en el M1 = 17148.90 ppt, M2= 1043.71, M3= 471.75 y M4= 1425.26; como se muestra en la figura 6.

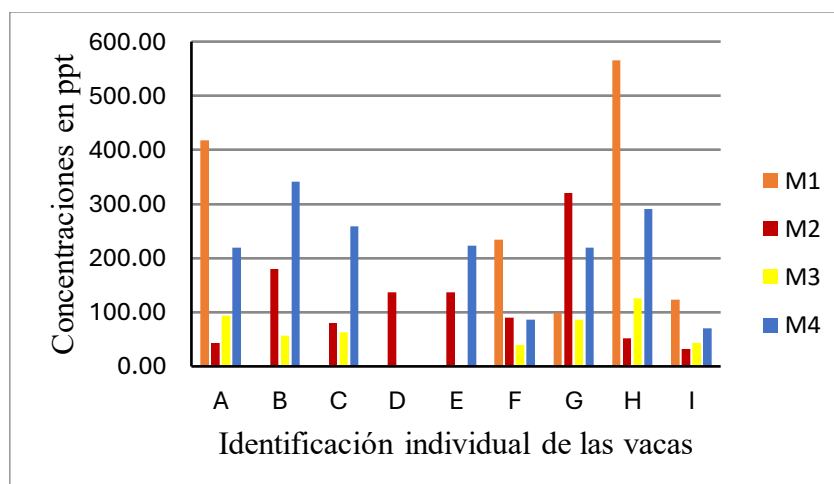


Figura 6. Concentraciones individuales de SF_6 reportadas en partes por trillón, donde M1 indica el primer muestreo, M2 el segundo muestreo, M3 el tercer muestrero y M4 cuarto muestreo.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis de correlación de Pearson para detectar si las variables evaluadas influyen en las concentraciones de CH₄ (g), SF₆ (ppt) individuales en los bovinos criollos. En el cuadro 3 se observa que existe una correlación positiva entre la tasa de permeación de las cápsulas intraruminales y las concentraciones de CH₄ y SF₆ detectadas por el cromatógrafo.

Cuadro 3. Coeficiente de correlación de las variables evaluadas y las emisiones de CH₄

	Concentración de CH ₄	Concentración de SF ₆	Emisiones de CH ₄ (g d ⁻¹)	Flujo de RI	Tasa de liberación SF ₆
Concentración de CH ₄	1	0.619 (0.076)	-0.224 (0.5620)	0.421 (0.2595)	0.865 (0.0026)
Concentración de SF ₆	0.618 (0.076)	1	-0.244 (0.5277)	0.467 (0.2048)	0.848 (0.0038)
Emisiones de CH ₄ (g d ⁻¹)	-0.224 (0.562)	-0.244 (0.5277)	1	0.084 (0.8302)	-0.271 (0.4799)
				1	
Flujo de RI	0.421 (0.2595)	0.467 (0.2048)	0.084 (0.8302)		0.490 (0.1801)
Tasa de liberación SF ₆	0.865 (0.0026)	0.848 (0.0038)	-0.271 (0.4799)	0.490 (0.1801)	1

CH₄ (metano), SF₆ (hexafluoruro de azufre), g (gramos), d (días), ppm (partes por millón), ppt (partes por trillón).

Se puede observar también, que las emisiones calculadas de metano (g d⁻¹) en promedio fueron de 206 g y con desviación típica de 59.778 (Cuadro 4). Esta información es coincidente con los datos presentados por otros autores (Pinares *et al.*, 2008) en donde las tasas de permeación de las cápsulas influyen en las estimaciones de CH₄ emitidas siempre y cuando exista un rango amplio entre las tasas de permeación de las cápsulas intraruminales (2.624 – 5.689 mg d⁻¹). Sin embargo, cuando los rangos entre las tasas de permeación son reducidos (2.214 – 3.594 mg d⁻¹) las estimaciones de CH₄ no se ven afectadas. En este estudio, el rango entre las tasas de permeación de las cápsulas fue de 2.570 – 4.740 (2.17 mg de diferencia;

Cuadro 4) lo que lo coloca dentro de los rangos aceptables de permeación sin llegar a generar estimaciones sesgados en los individuos.

Las emisiones de CH₄ reportados aquí oscilaron entre 106.910 y 293.750, inferiores a los 320 g d⁻¹ reportados por Pinares *et al.* (2008) con bovinos con pesos promedio superior a los 400 kg. Pero coinciden con los rangos de 102.1 a 114.2 gd⁻¹ de CH_{4<A}

reportados también por Piñares *et al.*, (2008) con vacas Friesian × Jersey con pesos promedio 524 kg. En este sentido, las vacas usadas en este trabajo tenían peso promedio de 300 kg, para el peso que tenían estos bovinos en el periodo experimental, las emisiones pudieran parecer elevadas, sin embargo, las emisiones metano se ven modificadas por diversos factores, entre ellos la calidad del forraje consumido.

Cuadro 4. Valores promedios estimados para las variables evaluadas.

Variable	N	Media	Desviación	Suma	Mínimo	Máximo
Concentración de CH ₄ (ppm)	9	90.063	43.709	810.570	33.150	171.980
Concentración de SF ₆ (ppt)	9	148.799	93.340	1339	43.380	320.350
Emisiones de CH ₄ (gramos)	9	206.199	59.778	1856	106.910	293.750
Flujo de RI (mL min ⁻¹)	9	1.444	0.527	13.000	1	2
Tasa de liberación SF ₆ (mg d ⁻¹)	9	3.718	0.754	33.460	2.570	4.740

CH₄ (metano), SF₆ (hexafluoruro de azufre), mg (miligramos), d (días), ppm (partes por millón), ppt (partes por trillón).

VII. CONCLUSIÓN

Bajo las condiciones en las que se desarrolló el presente experimento, la implementación de la técnica SF₆ permite estimar las emisiones de metano en bovinos criollos en condiciones de agostadero. Las emisiones estimadas con los bovinos coinciden con las emisiones típicas reportadas en la literatura científica. Se destaca que la técnica permite conocer la emisión de metano entérico para cada bovino individualmente, un problema frecuente es la eficiencia de la gamarra por la ruptura o pérdida de la misma, lo que influye en la obtención y variabilidad de los resultados.

VIII. REVISIÓN DE LITERATURA

- Aguiar Z. and Rojas B. 2014. Métodos utilizados para reducir la producción de metano endógeno en rumiantes. *Nutrición Animal Tropical* 8 (2): 72-90
- Armstrong E.; Rodriguez A.; McIntosh, M.; Poli M.; Cibils A.; Martínez Q.; Félix P. and Estell R. 2022. Genetic and productive background of Criollo cattle in Argentina, Mexico, Uruguay and the United States. *Journal of Arid Environments* 200: 104722.
- Bonilla C. and Lemus F. 2012. Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático. *Mexicana de Ciencias Pecuarias* 3 (2): 215-246.
- Carmona 2005. El gas metano en la producción ganadera y alternativas para reducirlo. En línea: https://www.google.com.mx/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.scielo.org.mx/scielo.php%3Fscript%3Dsci_arttext%26pid%3DS2007-11242012000200006&ved=2ahUKEwiB1Z-tt4qOAxWYEkQIHW_-AVgQFnoECDcQAQ&usg=AOvVaw3sQmL7ixGv1n1PqvQAjWxf
Consultado: 24/06/2025.
- CEFPP (Comité Estatal de Fomento y Protección Pecuaria de Chihuahua). 2024. La ganadería de carne y su mercado internacional. En línea : https://www.cfppchihuahua.com.mx/ganaderia_mercado_int.html Consultado: 17/06/ 2025.
- CEPSA (Compañía energética y química global). 2015. Moeve Global. En línea: https://www.moeve.es/stfls/CepsaCom/Coorp_Comp/Medio%20Ambiente_Seguridad_Calidad/Articulos/Dossier-Cambio-Climatico-y-GEI.pdf Consultado: 17/06/ 2025.
- Church D. 1993. El rumiante : Fisiología digestiva y nutrición. 1ra. ed. ACRIBIA, España: 652p
- Crosby G. and Ramírez M. 2018. Técnica de producción de gas in vitro para estimar la producción de metano. *Agroproductividad* 11 (2): 64-69

- Gerber P.; Steinfeld H.; Henderson B.; Mottet A.; Opio C.; Dijkman J. and Tempio, G. 2013. Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería. 1ra. ed. FAO. México. 154p.
- Gere J. 2012. La técnica de trazado por SF6 para medir emisiones de metano de rumiantes en pastoreo: Desarrollos metodológicos y algunas aplicaciones. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas UNCPBA. Argentina. 142 p.
- Grainger C.; Clarke T.; McGinn M.; Auldist M.; Beauchemin K.; Hannah M.; Waghorn G.; Clark H. and Eckard R.J. 2007. Methane emissions from dairy cows measured using the sulfur hexafluoride (SF6) tracer and chamber techniques. American Dairy Science Association 90: 2755- 2766
- Hernández L. 2001. Historia ambiental de la ganadería en México. 1ra. ed. Instituto de Ecología. Veracruz: 259p
- Hristov A.; Giallongo F.; Frederick H.; Weeks P.; Zimmerman M.; Harper R.; Hristova R. and Branco A. 2015. The use of an an automated system Greenfeed to monitor enteric methane and carbon dioxide emissions from rumiantes animals. National Library of Medicine 7: 103-52904
- INECC 2018. Gobierno de México. En línea: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero> Consultado 24/06/25
- INEGI (Instituto nacional de estadística y geografía).2023. Censo Agropecuario. En línea: https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ca/2022/doc/ca2022_rdnal.pdf Consultado: 17/06/ 2025.
- INIA (Istituto nacional de investigación agropecuaria) 2022. Protocolo para determinación de emisión de metano en rumiantes. En línea: <file:///Users/renatateyssier/Desktop/ARTICULOS%20TESIS/INIA%20URUGUAY.pdf> f Consultado 24/06/2025
- IPCC (Grupo Intragubernamental de expertos sobre el cambio climático). 2019. Informe especial. En línea:

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_spanish.pdf Consultado en: 2/07/2025

- Jaurena G.; Juliarena P.; Errecart P.; Arroquy J.; Berone G. and Posse G. 2019. Técnicas para medir o estimar las emisiones de gases de efecto invernadero. Revista argentina de producción animal 39 (2) : 61-76.
- Johnson K. and Johnson D. 1995. Methane emissions from cattle. *Animal Science*. 73: 2483-2492.
- López O.; Vallejo H.; Paredes D.; Mendoza S. and Ramirez E., 2022. Implementación de la técnica de hexafluoruro de azufre (SF₆) para determinar las emisiones de metano en ovinos. *Agro Divulgación* 2 (5) : 53-55.
- Márquez G.; Álvarez H.; Morales N.; Corrales L.; García G. and Rodríguez A. (2024). Criollo Cattle Breeds as a Potential Alternative for Sustainable and Healthy Beef Production in America. *Society for Range Management*. Universidad Veracruzana. 96: 83-93
- Matthew M.; McIntosh S.; Spiegel S.; José C.; Richard E.; Caitriana M.; Emile .; Derek W.; Joel R. and Andrés F. 2023. Adaptación de las razas de ganado vacuno al entorno para obtener los resultados deseados en un clima cambiante: una revisión sistemática. *Revista de entornos áridos* 211: 2- 14
- Moate P.; Poppi D.; Marett L.; Jacobs J.L.; Barchia I. and Hegarty, R.S., 2021. Measurement of enteric methane emissions by the SF₆ technique is not affected by ambient weather conditions. *Animals* 11: 528.
- Moscoso M.; Franco F.; San Martín H.; Olazábal L.; Chino V. and Pinares P. 2017. Producción de metano en vacunos al pastoreo suplementados con ensilado, concentrado y taninos en el altiplano peruano en época seca. *Investigación Veterinaria del Perú* 4 (28) : 822-833.
- NASA. 2025. Climate nasa. gov. En línea: <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/metano/?intent=111> Consultado: 24/06/ 2025.
- Núñez D.; Ramírez R. and Saavedra J. 2016. *CEIPA*. En línea: <https://descubridor.ceipa.edu.co/Record/ojs-dialnet-ART0001276286> Consultado: 17/06/ 2025

- Palma G. J. 2014. Escenarios de sistemas de producción de carne de bovino en México. *Avances en la Investigación Agropecuaria* 18: 53–62.
- Pereira C.; Teixeira L.; Boyle L.; Machado P.; Williams O. and Enriquez Hidalgo, D. 2021. The equipment used in the SF6 technique to estimate methane emissions has no major effect on dairy cow behavior. *Frontiers in Veterinary Science* 7: 1-8.
- Pinares P.; Vlaming J.; Williams S. and Clark H. 2008. The SF6 tracer technique for measurements of methane emission from cattle: Effect of tracer permeation rate. *Canadian Journal of Animal Science* 1:309 - 319
- Sanchez S.; Saynes S.; Jose I.; Gere G.; Cruz M.; Guillermo J.; Astigarragae L.; Loza C.; Padilla J. and Ramírez B. 2021. Influence of supplemental dietary copper in high roughage rations on nutrient digestibility and methane emission in Holstein bulls. *Livestock Science. México*. 244: 2-4
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) Gobierno de México. 2023. En línea: https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_pecuario/ Consultado: 17/06/ 2025.
- Tedeschi O.; Abdalla A.; Álvarez C.; Anuga S.; Arango J. and Beauchemin K. 2022. Quantification of methane emitted by ruminants: a review of methods. *Journal of Animal Science* 100: 1–22.



Oficio No. FCAyP/332/2025

Renata Paulina Teyssier Rugerio
Egresada de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
PRESENTE

Con base en el dictamen emitido por el Dr. Edgar Valencia Franco (**Director de Tesis**), Dr. Bernardino Espinoza Velasco (**Codirector**), Dr. Marcos Pérez Sato (**Asesor**) y Dr. Numa Pompilio Castro González (**Asesor**) en su calidad de Consejo Particular, se autoriza la elaboración digital de la tesis titulada:

Implementación de la técnica de trazado por hexafluoruro de azufre con bovinos criollos en agostadero

Correspondiente a la Licenciatura en Ingeniería Agronómica Y Zootecnia.

Sin otro particular por el momento, me despido reiterando a Usted mi más atenta y distinguida consideración.

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor"

San Juan Acateno, Teziutlán, Pue., a 02 de Julio de 2025.

Dr. Armando Ibáñez Martínez

Director de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias



c.c.p. - Archivo y Minutario
 Dr. AIM/mlsm

Facultad de Ciencias
 Agrícolas y Pecuarias

Av. Universidad s/n San Juan Acateno
 Teziutlán, Pue., C.P. 72365
 01 (231) 31 2 29 33 y 01 (233) 31 8 00 17