

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

CENTRO UNIVERSITARIO UAEM TEMASCALTEPEC

LICENCIATURA EN INGENIERO AGRONOMO ZOOTECNISTA

TESIS

DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE EMISIÓN DE METANO ENTÉRICO EN BECERROS DE RAZA HOLSTEIN

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TITULO DEDE INGENIERO AGRONOMO ZOOTECNISTA

PRESENTA:

JONATHAN ULISES VÁZQUEZ FLORES

ASESOR:

DR. OCTAVIO ALONSO CASTELAN ORTEGA.

CO-ASESORA:

DRA. FRANCISCA AVILES NOVA

TEMASCALTEPEC, ESTADO DE MÉXICO

Resumen:

En México los inventarios de gases de efecto invernadero como el Metano (CH_4), emitido por el sector ganadero son limitados, esto debido a la complejidad y equipo sofisticado con el que se obtienen las mediciones, no obstante, para generar dichos datos, requiere un gran compromiso, sobre todo gracias a los resultados que arrojen son de gran ayuda, con el fin de plantear acciones para contrarrestar el calentamiento global y el cambio climático. ; La presente investigación, desarrollada en el laboratorio de ganadería, medio ambiente y energías renovables de la FMVyZ, utilizó el método de las cámaras de respiración de circuito abierto para medir la producción de CH_4 en donde se utilizaron cuatro becerros de la raza Holstein para medir su producción de este gas. Se generaron datos precisos de estas emisiones, buscando tener una respuesta favorable para la actualización oportuna de los inventarios nacionales y sobre todo encontrar posibles alternativas para la reducción de las emisiones de GEI siendo, el CH_4 el gas objetivo principal de estudio.

Palabras clave: CH_4 (metano), Becerros Holstein, AGV, gas entérico.

Abstract:

In Mexico, inventories regarding methane (CH_4) emissions from the livestock sector are limited due to the complexity of the analysis and the sophisticated equipment required. Nevertheless, generating such data reflects a strong commitment, as the resulting findings are invaluable for devising strategies to mitigate this adverse effect. This research—conducted at the Faculty of Veterinary Medicine and Animal Science (FMVyZ) of the Autonomous University of the State of Mexico (UAEMex)—reaffirms the institution's commitment to environmental stewardship, specifically regarding the study of these gases, which are among the most significant pollutants. While livestock farming contributes to these emissions, Mexico possesses a wide variety of tannin-rich vegetation; when consumed by ruminants, these tannins allow the animals to utilize the available nutrients while simultaneously leading to a significant reduction in greenhouse gas (GHG) emissions during metabolism.

This study, carried out at the FMVyZ's Livestock and Environment Laboratory (located at the university's animal science research station), utilized CH_4 measurement chambers—a cornerstone of the data collection process—to analyze Holstein calves. Precise emission data were generated with the aim of facilitating the timely updating of national inventories and, above all, identifying potential alternatives for addressing GHG emissions, with a primary focus on CH_4. Keywords: CH_4 (methane), Holstein calves, VFA (volatile fatty acids), enteric gas.

Contenido

Resumen: 3

Abstract: 4

Índice de Figuras 7

Índice de tablas 9

I. INTRODUCCIÓN 10

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 13

III. JUSTIFICACIÓN 15

3.1. Ambiental 15

3.2. Productiva 15

IV. OBJETIVOS 16

4.1. Objetivo General 16

4.2. Objetivos Específicos 16

V. HIPÓTESIS 17

VI. REVISIÓN DE LITERATURA 18

6.1. Cambio climático y efectos de GEI 18

5.1. CH_4 19

6.2. Ganadería y emisiones de metano 21

6.3. Fisiología del rumen 24

6.4. Metanogenesis Ruminal 28

6.5. Factores que afectan la emisión de metano 29

6.7. Taninos y flavonoides 31

VII. MATERIALES Y MÉTODOS 33

7.1. Cámaras de circuito abierto 33

7.3. Animales 42
7.4. Tratamientos 44
7.5. Dieta base 47
7.5. Variables evaluadas 50
7.6. Periodo de tiempo del experimento 51
7.8. Diseño Experimental 52
7.9. Análisis estadístico 53
VIII. RESULTADOS 54
IX. DISCUSIÓN 57
X. CONCLUSIONES 59
XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 60

Índice de Figuras

FIGURA 1 PRINCIPALES FUENTES DE GEI 14
FIGURA 2 FUENTE DE EMISION Y ABSORCION DE GASES 19
FIGURA 3 ESTRUCTURA QUÍMICA DEL CH_4 20
FIGURA 4 EVOLUCIÓN DE LAS TEMPERATURAS MEDIAS GLOBALES 21
FIGURA 5 INVENTARIO DE CABEZAS DE GANADO DE 2007-2025 22
FIGURA 6 BECERROS CRIADOS EN SISTEMA INTENSIVO 23
FIGURA 7 GANADO DESARROLLADO EN UN SISTEMA DE PASTOREO 24
FIGURA 8 SISTEMA DIGESTIVO DE RUMIANTE ADULTO 25
FIGURA 9 ESQUEMA ANATOFISIOLOGICO DEL SISTEMA DIGESTIVO DEL BOVINO 26
FIGURA 10 METABOLISMO DE CARBOHIDRATOS EN RUMIANTES 28
FIGURA 11 BACTERIAS DEL RUMEN ENCARGADAS DE LA METANOGENESIS 31
FIGURA 12 UBICACIÓN DE LABORATORIO, FMVYZ UAEMEX 33
FIGURA 13. ASPECTOS DEL INTERIOR DE UNA CÁMARA DE RESPIRACIÓN DE CIRCUITO ABIERTO DEL LABORATORIO DE GANADERÍA, MEDIO AMBIENTE Y ENERGÍAS RENOVABLES DE LA FMVZ-UAEMEX. 34
FIGURA 14 CÁMARA YA EN FUNCIONAMIENTO CON EL BECERRO 35
FIGURA 15 EQUIPO DE ANÁLISIS CIENTÍFICO CONECTADO A LAS CÁMARAS DE RESPIRACIÓN DE CIRCUITO ABIERTO PARA MEDIR LAS EMISIONES DE CH_4. 36
FIGURA 16. IMAGEN DE SOFTWARE EXPEDATA ENCARGADO DE LA CAPTURA Y ANÁLISIS DE LOS DATOS DE EMISIONES DE CH_4 GENERADOS POR LAS CÁMARAS DE RESPIRACIÓN. 37
FIGURA 17 MANUAL DE USO PARA EL EQUIPO DE MEDICIÓN DE EMISIONES DE CH_4 POR EL GANADO BOVINO. 38
FIGURA 18 PC UTILIZADO PARA EL REGISTRO DE DATOS 39
FIGURA 19 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN 40
FIGURA 20 DRIERITA, USADA COMO FILTRO PARA 41
FIGURA 21 LLAVES DE MEZCLA DE GASES PARA CALIBRACIÓN 42
FIGURA 22 BECERROS HOLSTEIN UTILIZADOS PARA MEDIR LAS EMISIONES DE CH_4 ENTÉRICO. 43
FIGURA 23 CIRIAN PROCESADO PARA EL TRATAMIENTO 44

FIGURA 24 BECERROS CONSUMIENDO EL ALIMENTO..... 45
FIGURA 25 ASPECTO DEL EXPERIMENTO EN DONDE SE OBSERVAN A DOS BOVINOS EN LAS CÁMARAS DE RESPIRACIÓN DE CIRCUITO ABIERTO..... 46
FIGURAS 26, INGREDIENTES UTILIZADOS EN LA DIETA BASE, A) RASTROJO DE MAÍZ, B) PASTA DE SOJA, C)MAÍZ MOLIDO D)SALVADO DE TRIGO 48
FIGURA 27 REVOLTURA DE INGREDIENTES PARA CONCENTRADO..... 49
FIGURA 28 MANEJO DE BECERRO DURANTE EL EXPERIMENTO..... 51
FIGURA 29 PESAJE DE BECERROS PARA OBTENER GANANCIAS DE PESOS 56

Índice de tablas

TABLA 1 TRATAMIENTOS Y ADITIVOS UTILIZADOS DURANTE EL EXPERIMENTO, OFRECIDO EN CADA TRATAMIENTO 45

TABLA 2 CONCENTRADO ELABORADO OFRECIDO A LOS BECERROS DURANTE EL EXPERIMENTO 47

TABLA 3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA DIETA BASE. 48

TABLA 4. SECUENCIA DE TRATAMIENTO ASIGNADOS EN EL EXPERIMENTO CON UN DISEÑO DE CUADRADO LATINO ACOMODO DE DISEÑO EXPERIMENTAL POR CUADRADO LATINO 4X4 52

I. INTRODUCCIÓN

El incremento de la población en las últimas décadas ha tenido un impacto significativo en las grandes urbes, ya que ahí se concentran los servicios generales que abastecen las necesidades de la sociedad, en modelos modernos de condiciones de vida haciendo más complejo este modo de vida para el sector industrial. Estos procesos han tenido repercusiones en términos de contaminación, la generación de residuos, caos y tráfico vial representa un desequilibrio y hasta perdida en los ecosistemas, esto ha orillando a la disminución parcial del territorio para la producción de agrícola y pecuaria, representando un cambio en el uso de la tierra pues grandes extensiones de bosques, selvas y regiones agrícolas se transforman en ciudades (Garza G. 2010)

En este contexto, para el abastecimiento de la demanda de alimentos, la ganadería y la agricultura mantienen un rol fundamental, siendo sobretodo la ganadería de las más importantes para la producción de proteínas de alta calidad biológica y excelente perfil nutricional, sobre todo con seguridad alimentaria, y no solo eso, esta actividad también es fuente de ingresos para una parte de la población rural, sin embargo, la extensión territorial para esta actividad se ha visto afectada por el cambio en el uso del suelo como por ejemplo, el crecimiento de las grandes metrópolis, zonas habitacionales, parques industriales, etc. (A Müller, *et al.,* 2016)

Por otra parte, durante los últimos tiempos debido a las exigencias de la demanda cárnica, láctea, piel, huevo, etc. Los sistemas de producción han sido más sofisticados y de magnitud industrial también, aunque esta tecnificación intensa ha permitido satisfacer la demanda del mercado, la competencia y los desafíos en este sector orientadas a nivel ambiental, debido a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), las cuales contribuyen al cambio climático, por lo tanto, esto implica un reto para contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).,

La ganadería aporta aproximadamente el 18% de las emisiones de GEI, principalmente con la formación y expulsión de gases entéricos como el CH_4 y el CO_2, por lo tanto, debemos intervenir en las emisiones de CH_4 por fermentación

entérica. (Vázquez-Carrillo, et al., 2020) con el objeto de reducir su emisión y contribuir a mitigar el cambio climático.

Por otro lado, y debido a la producción animal acelerada moderna, se necesita reducir el tiempo de finalización del ganado bovino, pero cumpliendo las normas de seguridad alimentaria, es por eso que las estrategias de alimentación, con ello la manipulación de la fermentación ruminal, con estrategias en la alimentación son más complejas, representando modificaciones prometedoras para contrarrestar las emisiones de CH_4, sin comprometer el desarrollo productivo del ganado (Church D. C. 1993).

Entre los estudios enfocados a las estrategias nutricionales, existen aditivos de origen vegetal, que en su estructura contienen taninos, compuestos fenólicos causando efectos en la microbiota ruminal, aunque tiene variantes a considerar, el resultado final de los efectos logra ser positivo ante la reducción en la metanogenesis con esto mejorar la eficiencia y aprovechamiento de los nutrientes (Salem, et al., 2009).

En este sentido, existe una preocupación actual de los gobiernos mundiales de contar con inventarios actuales de GEI y en el caso de la ganadería bovina, inventarios confiables de emisiones de CH_4, el cual es un gas 28 veces más poderoso que el CO_2 para crear calentamiento global, de ahí la importancia de contar con inventarios confiables. Lo anterior con el fin de generar con una línea base de emisiones a partir de la cual se puedan plantear planes y programas gubernamentales para reducir las emisiones de este gas con origen en la ganadería bovina. Es decir, si se conoce el volumen de emisión actual de CH_4 de la ganadería, será más fácil poder observar el efecto de diferentes estrategias de mitigación sobre la reducción de las emisiones de este has. Los inventarios de GEI se refieren a la contabilización minuciosa del volumen de GEI que emite un sector productivo, y se expresa en gigatonelas o megatoneladas de CO_2 equivalente (Ángeles-Hernández, et al., 2024). Los inventarios de emisiones de CH_4 más completos cuentan con factores de emisión (FE) de bovinos de diferentes edades, pesos, función productiva y raza. Por muchos años los inventarios de emisiones de CH_4 en México se

elaboraron con FE por defecto obtenidos del Panel Intergubernamental de para el cambio climático (IPCC por sus siglas en inglés). Recientemente con el desarrollo de los laboratorios de ganadería y cambio climático de la UAEMEX y la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) ha sido posible medir emisiones de CH_4 por el ganado bovino en México. En estos laboratorios se han desarrollado los primeros FE para el ganado bovino de México para el caso de la ganadería de clima tropical como para ganado de clima templado, sin embargo, ahora es necesario generar factores de emisión para bovinos de diferentes edades.

Por lo tanto, la presente investigación se enfocó en determinar el factor de emisión de CH_4 entérico en becerros de raza Holstein, alimentados a partir de una dieta base y de ella combinada con tres tratamientos diferentes (aditivos de origen vegetal), con taninos, así evaluando los efectos ante la metano-génesis, como una estrategia sostenible en los sistemas de producción bovina y a su vez aportando FE para el desarrollo de los inventarios nacionales.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El CH_4 es uno de los gases más contaminantes que es emitido por diversos sectores (Cruz C. 2016), y el sector agropecuario ha sido señalado por ser uno de los principales emisores de CH_4, en especial la ganadería bovina, solo por debajo de la producción de energía fósil, y como ya se mencionó con anterioridad se calcula que en conjunto este emita la ganadería bovina emite un 18% del total de GEI (fuente) del sector agropecuario el cual contabiliza el 25% de todos los GEI del sector agropecuario como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales fuentes emisoras de GEI de origen antropogénico

Lugar	Fuente emisora	% Emitido
#1	Uso de tierras y modificaciones	36%
#2	Gestión del estiércol	31%
#3	Producción animal	25%

En conclusión, ante un crecimiento significativo de la población es necesario la producción de alimentos de manera más acelerada, pero respetando la calidad e inocuidad, es por eso que el sector primario ha optado por generar sistemas de producción animal más sofisticados, por otro lado la menor extensión territorial disponible para la ganadería ha llevado a que estas producciones se desarrollen en pequeñas fracciones de espacio, en consecuencia hablando de los ranchos productores de ganado bovino para abasto de carne se han visto perjudicados, ya que la concentración de animales es mayor en espacios un tanto reducidos (pero aptos) , en consecuencia, la generación de GEI es mayor por unidad de superficie.

Aunado a esto la demanda por carne de calidad últimamente ha sido tendencia, por lo tanto, las dietas, para alcanzar el objetivo de manera más rápida, han sido

elaboradas de una manera que han alcanzado una fermentación entérica a niveles altos, es por eso que con ayuda de fuentes de origen vegetal para mitigar estas emisiones.

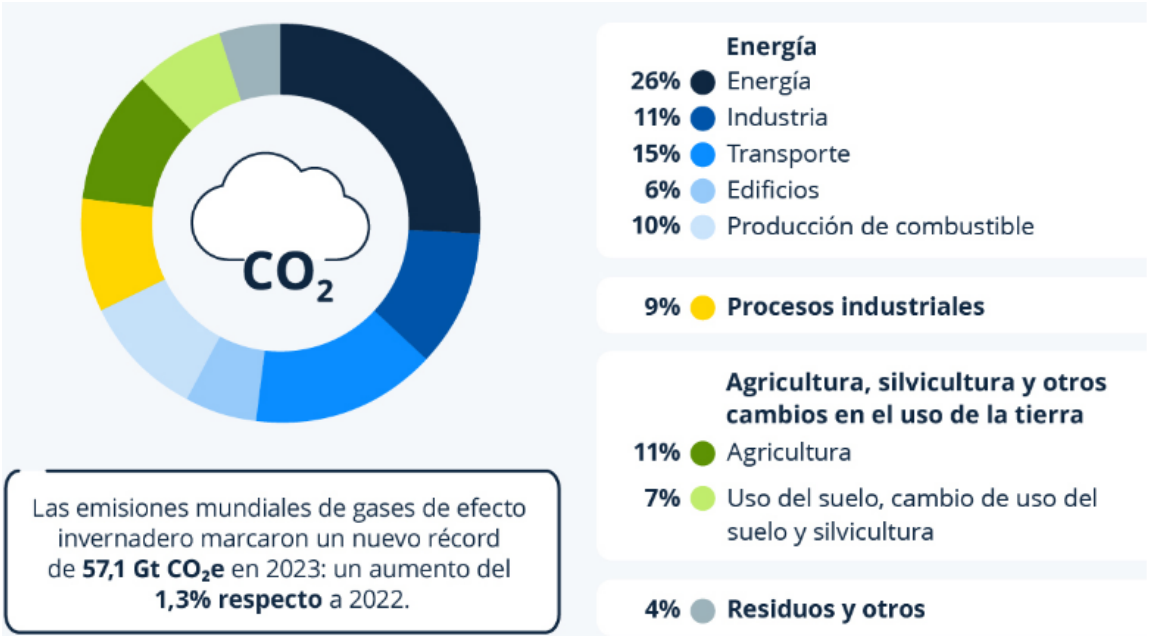


Figura 1 Principales fuentes de GEI

Fuente: Kunak sensin anywhere, 2023

III. JUSTIFICACIÓN

3.1. Ambiental

La producción de CH_4 entérico representa una de las principales perdidas energéticas en la alimentación de rumiantes y al mismo tiempo una fuente significativa de GEI provenientes del sector pecuario. Sin embargo, la mayoría de los FE disponibles han sido generados a partir de sistemas productivos y condiciones ambientales distintas a las presentes en México, en consecuencia la ganadería se ha satanizado por el alto contenido de gases contaminantes que arroja el ganado a través del eructo, orina y estiércol, así mismo por la gran cantidad de residuos acumulados en el suelo, pese a todo esto, actualmente es imposible acabar con la emisión de este gas contaminante ya que su producción es el resultado de un largo proceso evolutivo desarrollado por los rumiantes para deshacerse del H_2 metabólico que se produce como consecuencia de la fermentación microbiana de los alimentos en el rumen, sin embargo, si podemos trabajar con alternativas para mitigar las emisiones (Castelán-Ortega, 2024)

3.2. Productiva

Los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero dan cuenta del total de emisiones a partir de las diferentes fuentes antropogénicas y naturales, en el caso del CH_4 las principales fuentes son la ganadería y la industria petrolera (Ángeles-Hernández et al., 2024). En este sentido se reporta para México un inventario anual de 2039.21 ± 205 Gg CH_4 año, para 2018 (Castelán et al., 2024). El CH_4 producido por fermentación entérica, en el año 2019 contribuía con el 84% del total producido del sector agropecuario.

Los inventarios de emisiones de CH_4 son un insumo esencial para los modelos de calidad del aire, dando paso a ser una herramienta crucial para las investigaciones de los expertos que monitorean la calidad del aire, con esto poder hacer una estadística de progreso hacia los objetivos de mitigación que conlleve a la definición de estrategias de mitigación, útiles también para la presentación de informes internacionales (Beauchemin y McGinn, 2025)

IV. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Determinar FE de emisión de CH_4 por becerros de la raza Holstein, a través del método de las cámaras de respiración de circuito abierto, alimentados con una dieta base y/o cuatro plantas tanifereas.

4.2. Objetivos Específicos

- Determinar el efecto del tratamiento (TB) con 220 g de MS de *Crescentia alata* (cirian) en respuesta a la emisión de metano.
- Determinar el efecto del tratamiento (TC) con 175 g de MS de *Gliricidia sepium* y 175 g de MS de *Guazuma ulmifolia (caulote)* en respuesta a la emisión de metano.
- Determinar el efecto del tratamiento (TD) con 110 g de MS de *Crescentia alata*, 87.5 g de MS de *Gliricidia sepium (cacahuanache)*, 87.5 g de MS de *Guazuma ulmifolia (caulote)*, y 124 g de MS de *Cosmos bipinnatus (mirasol)* sobre la emisión de metano.
- Determinar y comparar el efecto de tratamiento de control (C) de la dieta con concentrado sin los aditivos anteriores y emisión de CH_4.

V. HIPÓTESIS

La incorporación de plantas taníferas, reduce la emisión de CH_4 de becerros de raza Holstein.

VI. REVISIÓN DE LITERATURA

6.1. Cambio climático y efectos de GEI

El cambio climático es una incógnita que tras el paso del tiempo se ha vuelto más complejo su análisis y por ende la determinación de, que afectan al comportamiento; las variables climáticas ya que tienen una estrecha relación con procesos atmosféricos, estas condiciones estarán relacionadas con ciertas predominantes que existen en la superficie terrestre (precipitación, tiempos geográficos, movimientos terrestres, etc.). Pero estas alteraciones ya están consolidadas con el paso de los años, así mismo contribuyendo las actividades del ser humano, procesos industriales, radiaciones, químicos, afectando severamente las capas de la tierra (desgastándolas) haciendo que este efecto se intensifique, dando paso al calentamiento global y modificando el equilibrio climático en el planeta. (HB Ballesteros, et al., 2007)

Ballesteros en su investigación (2007), explica algunos componentes del cambio climático, siendo componentes existentes en la atmosfera, actuando receptores y emisores de radiación, el vapor de agua (H_2o), dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4) por mencionar algunos de los principales GEI.

En consecuencia, en la actualidad se han generado nuevos conceptos, uno de ellos la “la huella del carbono” la cual generaliza todos los GEI, enfocándonos a la industrialización y las necesidades básicas de la humanidad, el mal manejo de os desechos los cuales emiten gases contaminantes, estos atrapados en la atmosfera han cambiado las estructuras naturales, haciendo tendencia el calentamiento global. (Aguilera E. et al., 2020)

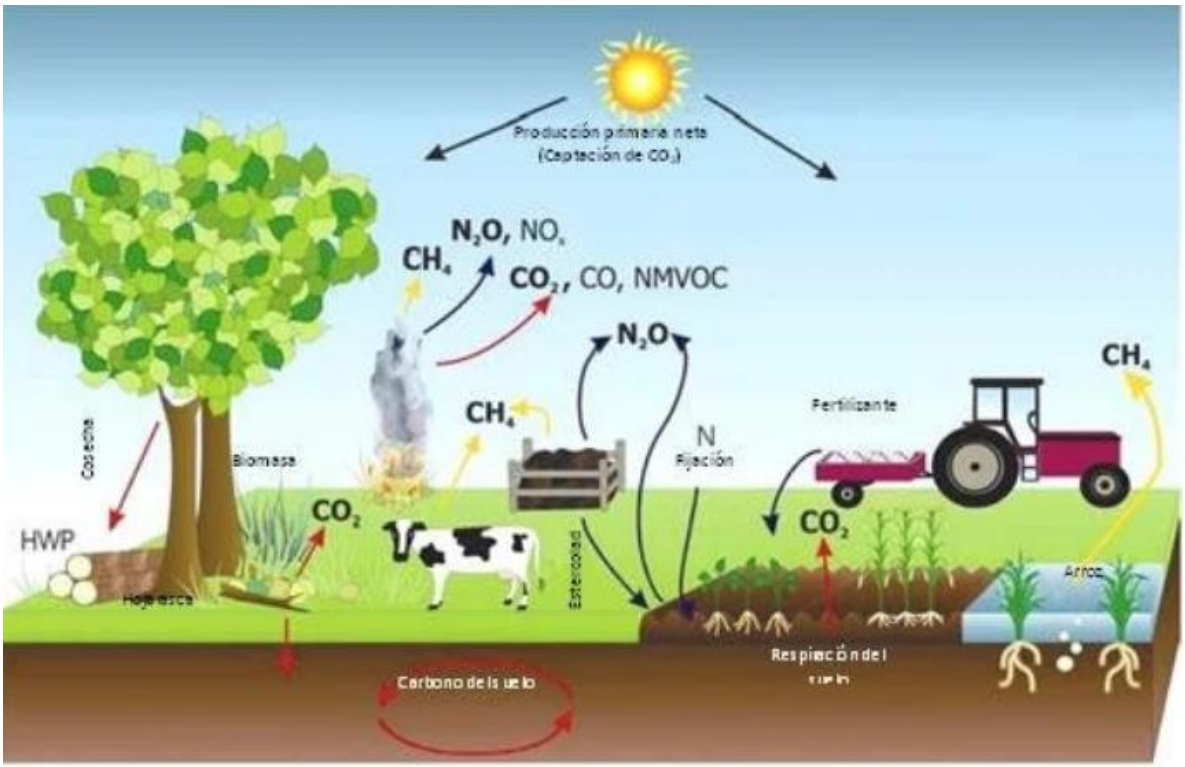


Figura 2 Fuente de emisión y absorción de gases

Fuente: IPCC, 2006

5.1. CH_4

Hidrocarburo que en su composición química tiene de un átomo de carbono y cuatro de hidrogeno, haciéndolo uno de los gases más contaminantes y duraderos en la atmosfera, señalado por estar presente en diversas actividades antropogénicas, aproximadamente en un 60% de las emisiones de la actualidad, el resto (40%) de forma natural. El ciclo del metano en la atmosfera está presente en tres diferentes tipos. (V. Manrique)

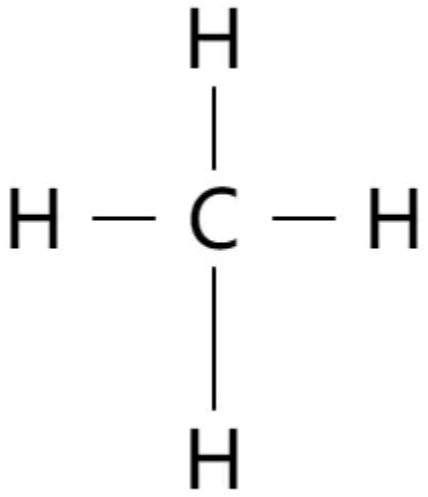


Figura 3 Estructura química del CH_4

Tabla 2. Principales fuentes de emisión de metano

Emisión	**Origen**
Fuentes Biogénicas	derivadas de actividades pecuarias y residuos, (degradación de MO, fermentación entérica, rellenos sanitarios.)
Fuente pirogénica	Asociadas con todos los procesos de combustión y de biocombustibles
Fuentes termogénicas	Relacionadas a partir de la transformación de la materia y procesos (petróleo, carbón, gas natural)

Aunque su permanecía atmosférica es menor a la de otros gases, su potencial de calentamiento global es considerablemente superior al paso del tiempo, como consecuencia de las actividades antropogénicas, la concentraciones de GEI, intensifica el calentamiento global y alterando el equilibrio climático del planeta, por lo que la identificación y mitigación de estas emisiones constituye una prioridad dentro de las estrategias internacionales para reducir el impacto ambiental y limitar el incremento de la temperatura global. (IPCC,2021)

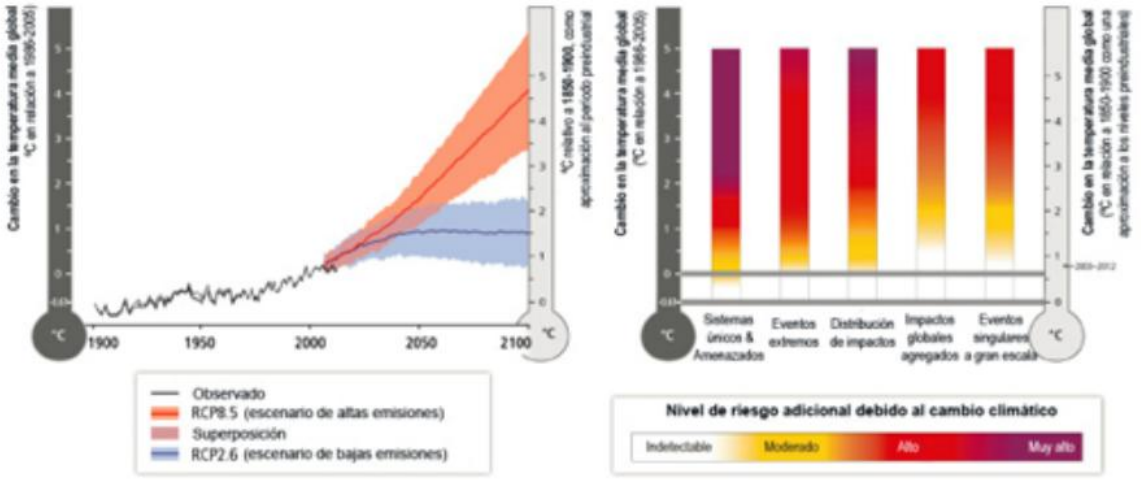


Figura 4 Evolución de las temperaturas medias globales

Fuente: IPPC 2021)

6.2. Ganadería y emisiones de metano

El CH_4, es uno de los gases más contaminantes que es emitido por diversos sectores y el sector agropecuario ha sido señalado por ser uno de los principales emisores, en especial la ganadería bovina, (Castelán-Ortega *et al.,* 2014)

México hace un aporte significativo a la producción de especies de bovino, para el año 2025, México contaba con un inventario de 36.6 Millones de cabezas de ganado bovino (carne y leche), aportando un aproximado de 33.9 millones para carne y apenas 2.7 de leche) siendo la especie con mayor cantidad de cabezas en el territorio (SENASICA, 2025).

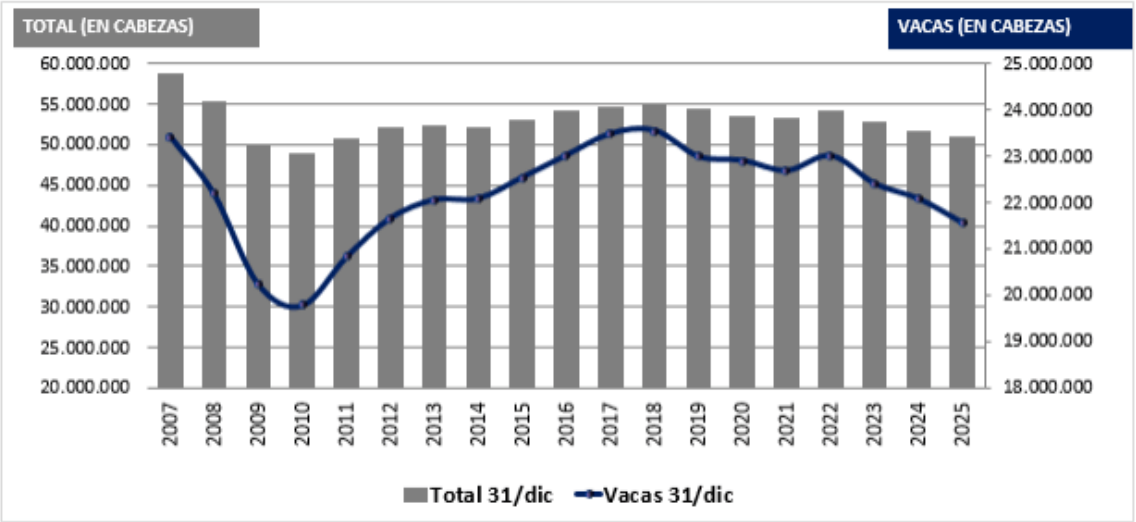


Figura 5 Inventario de cabezas de ganado de 2007-2025

Fuente: SIGSA, SENASA

Es necesario mencionar que la repercusión por emisiones de CH_4 como uno de los principales gases contaminantes por fermentación entérica es considerable, debido a los dos principales sistemas que se manejan en el ganado (intensivo y extensivo) y sobre todo el manejo, la utilización de la de la energía de los alimentos, gracias a la eficiencia en el sistema digestivo, debido a esto, es necesario reducir las pérdidas a través del CH_4. Y con esto desarrollar métodos y procedimientos robustos para la mitigación de este gas por fermentación entérica del ganado bovino en México, considerando que la flora en México también es extensa y podemos hacer la inclusión de plantas taníferas en la alimentación animal y así diseñar un Plan estratégico adecuado al contexto ganadero del país. (Vargas et al., 2012).



Figura 6 Becerros criados en sistema intensivo



Figura 7 Ganado desarrollado en un sistema de pastoreo

6.3. Fisiología del rumen

Los bovinos al ser rumiantes son seres, con la capacidad de nacer con un solo estomago (abomaso), encargado de la digestión de la leche y con el paso del tiempo y al transe de la dieta, va desarrollar el retículo, omaso y principalmente el rumen. (Figura 1)

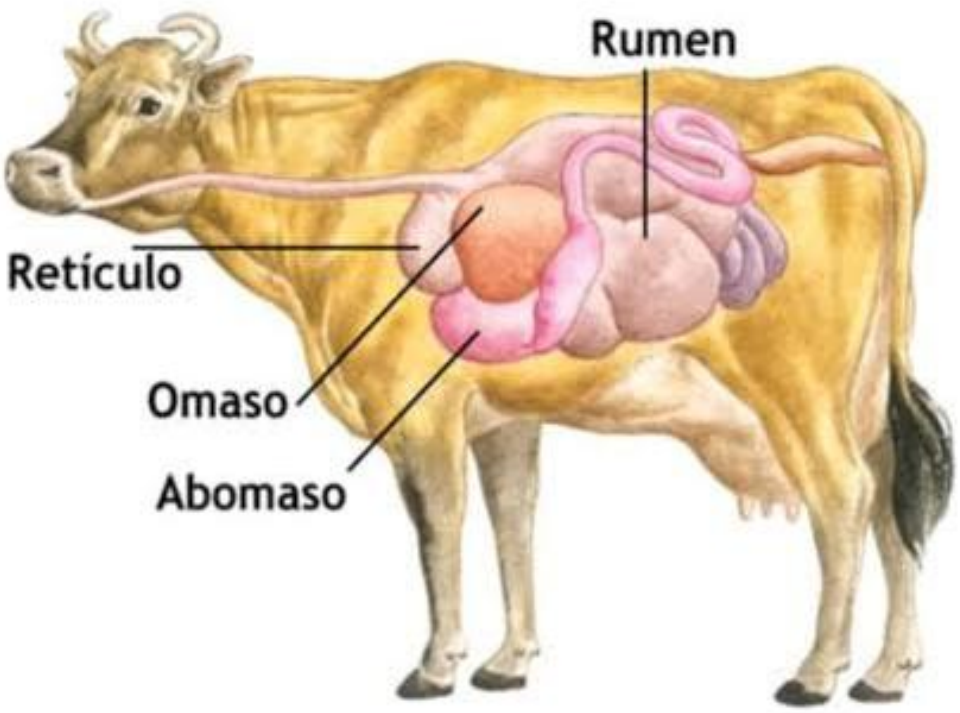


Figura 8 Sistema digestivo de rumiante adulto

Fuente: Cuaderno de cultura científica

En la etapa neonatal el becerro nace con su aparato digestivo adaptado a una dieta dependiente de la leche, y, por lo tanto, propia que aún no es de un rumiante. Por esta razón los divertículos estomacales (DE) aun no son funcionales, es decir, no están desarrollados, son pequeños al nacimiento y el cierre de la gotera esofágica es una estructura anatómica que conecta el esófago con el abomaso. En consecuencia, la capacidad de rumiar bajo condiciones normales de alimentación lo DE se van desarrollando mientras se hacen funcionales. (Relling et. Al. 202)

Con el rumen ya desarrollado adquiere la capacidad de poder degradar hidratos de carbono no estructurales y estructurales como la celulosa y hemicelulosa, de los forrajes y pastos; esta digestión se da por el proceso de fermentación microbiana, gracias a sus enzimas, dando como resultado el aprovechamiento de los alimentos fibrosos, una capacidad limitada en el caso de los monogástricos.

En el rumiante adulto el rumen puede llegar a ocupar hasta el 75 % de la cavidad abdominal y junto con su contenido representa alrededor del 30 % del peso vivo del

animal. El rumen se divide en cuatro cavidades: el retículo (red o redecilla), el rumen (panza), el omaso (librillo) y el abomaso (cuajar). Solo este último es glandular y funcionalmente análogo al estómago de los no-rumiantes.

En consecuencia, para que el animal pueda hacer una digestión fermentativa positiva, va a depender en gran porcentaje de la población microbiológica, en el rumen, pero para que esto funcione y se multiplique en sincronía, el rumen debe tener condiciones aptas para la población de microorganismos, entre las cuales encontramos; la correcta nutrición del animal, la cual va a definir la degradación parcial o total de lo que consuma el animal, así mismo que aporte lo indispensable tanto para la microbiota como para el animal, entre otras también entra la anaerobiosis, PH, temperatura; todo esto para un ambiente óptimo para la microbiología ruminal, debido a la relación simbiótica debe de existir alimento óptimo para el consumo de esta, (energía nitrógeno y minerales), todo esto funcionando correctamente favorecerá a la fermentación y multiplicación microbial. (Relling et. Al. 202)

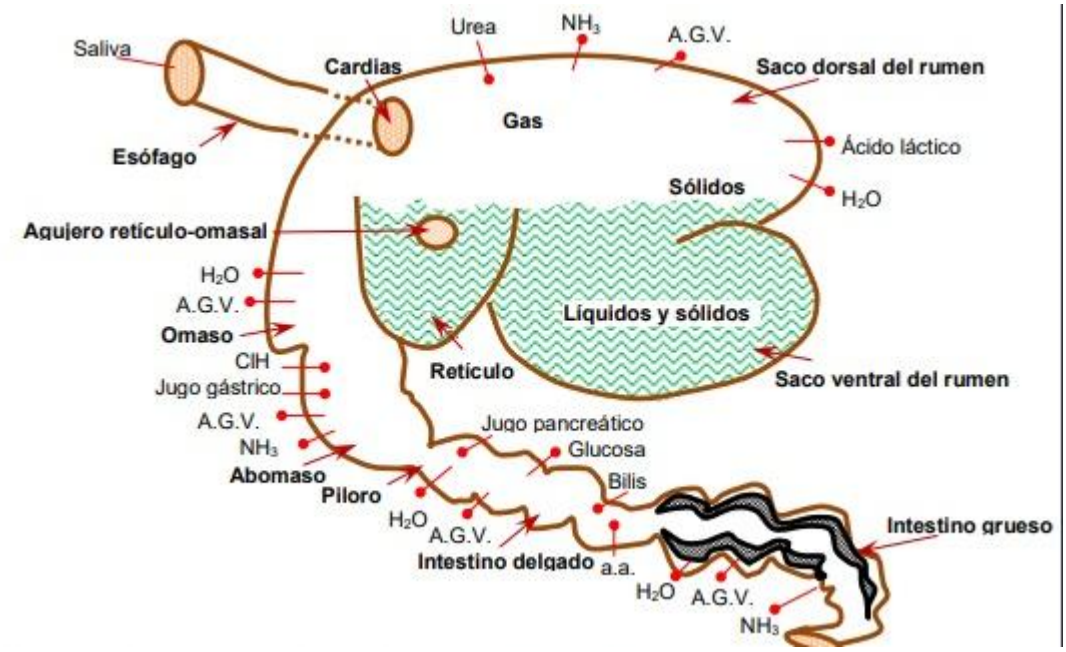


Figura 9 Esquema anatofisiologico del sistema digestivo del bovino

Fuente: Santini 2014.

La población microbiana del rumen es un tanto compleja ya que cada uno tiene una tarea diferente dentro de esta cavidad , entre los principales microrganismos ruminales, encargados de los alimentos que consume el animal, se encuentran las bacterias constituyendo entre un 40-50% las cuales tienen la capacidad de degradar una amplia variedad de sustratos (celulosa, almidón y adaptarse a los procesos que este conlleva, ya que debido a la variación de las dietas de los animales, deben de actuar en base a lo consumido, aunque existe una gran diversificación de bacterias, entre las más importantes están, *Ruminococcus, Fibrobacter, Prevotella, Selenomonas, Streptococcus y Ruminobacter.* Dando paso a otro componente microbial del rumen tenemos a los protozoos, ocupando un 50% de la biomasa ruminal, dentro de sus funciones principales esta la regulación del total de la población, así mismo dándole el enfoque nutricional, contribuye a la producción de AGV (Ácidos Grasos Volátiles), así mismo ayudan a digerir almidón y las fibras, componentes principales en algunos granos y forrajes.

Por otro lado, tenemos que tener un control en las dietas ya que cuando se produce ácido láctico en cantidades mayores, disminuirá el PH ruminal. Por lo tanto, las poblaciones de verán afectadas, por un ambiente desfavorable dando paso a afectaciones severas reflejada en trastornos metabólicos, lo cual nos perjudica en resultados esperados, tales como ingesta del alimento y disminuciones severas en eficiencias alimenticias.

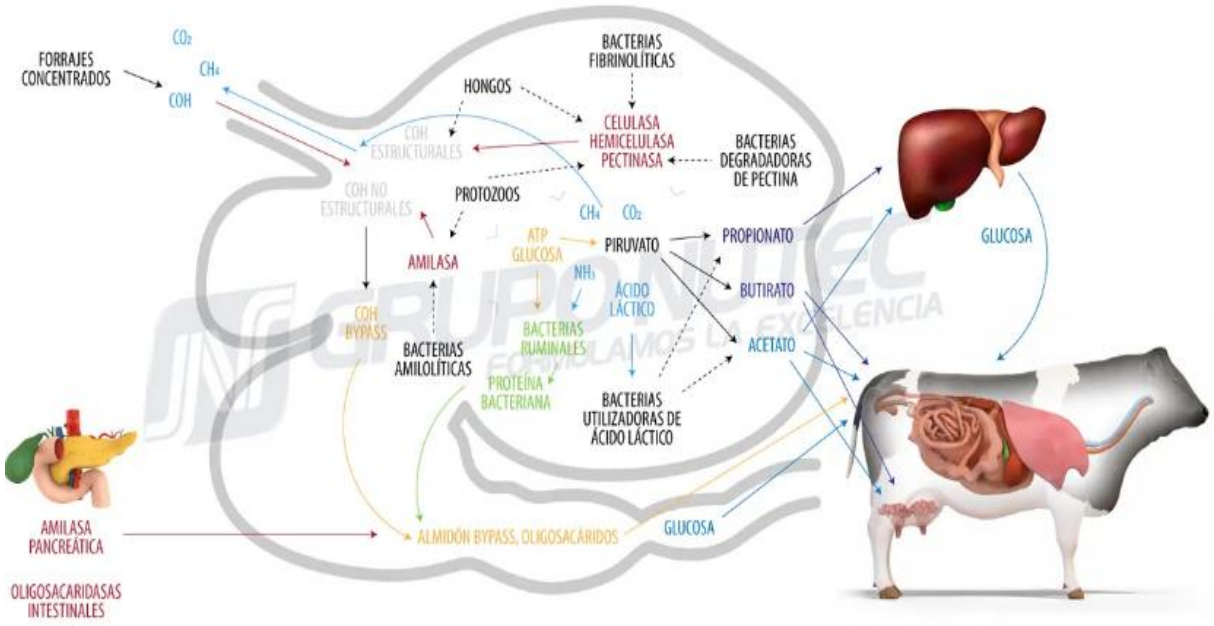


Figura 10 Metabolismo de carbohidratos en rumiantes

6.4. Metanogenesis Ruminal

Las bacterias, protozoos y hongos son fundamentales en el rumen, ya que actúan en simbiosis para permitir que los rumiantes digieran y fermenten la materia vegetal fibrosa, que de otro modo sería indigerible, especialmente las bacterias y los hongos, secretan enzimas que descomponen carbohidratos complejos como la celulosa y la hemicelulosa, son polisacáridos estructurales que componen las paredes celulares de las plantas, pero difieren en su estructura y composición. Por lo tanto, sin esta capacidad, el animal no podría extraer energía ni nutrientes del forraje. Dando paso a la producción de Ácidos Grasos Volátiles (AGV´s), a través de la fermentación microbiana de los carbohidratos, se generan AGV´s, que son la principal fuente de energía para el rumiante y son absorbidos directamente a través de la pared del rumen, teniendo en cuenta que la nutrición del rumiante depende estrechamente de la nutrición de su micro población ruminal, esta es la encargada de degradar parcial o totalmente los componentes que constituyen la dieta, para poder alimentar al animal. (Relling et al., 2022)

Entonces la producción de CH4 en rumiantes está ligada a la fermentación ruminal donde los microorganismos degradan carbohidratos estructurales y no

estructurales. En este proceso se producen AGV y los más comunes son acetato, propionato y butirato, los cuales no solo alimenta al animal, sino que determinan cuanta energía se pierde en CH_4.

6.5. Factores que afectan la emisión de metano

La emisión de CH_4 en los rumiantes es el resultado de las actividades producto del trabajo de los microorganismos metanogenos presentes principalmente en el rumen derivado generalmente a partir del alimento que consume el animal impactando considerablemente la población microbiana del rumen, ya que en base a lo que se le ofrece al animal podemos alterar este ambiente, generalmente las dietas con cantidades considerables de cereales, hace que los niveles de almidón se eleven, en consecuencia, la fermentación sea mejor.

6.6. Principales AGV

Lo que ocurre durante el proceso de fermentación anaerobia en el rumen, los microorganismos degradan los carbohidratos estructurales y no estructurales del forraje y de los ingredientes de la dieta, dando paso principalmente como producto na los ácidos grasos volátiles (AGV), entre los principales están acetato, propionato y butirato. Estos compuestos forman parte de la principal fuente de energía para los rumiantes, ya que aportan entre el 60% y un 80% de los requerimientos energéticos del animal. (Van Soest, 1994).

El acetato es el ácido graso volátil que se produce en mayor proporción, especialmente cuando los animales consumen dietas ricas en fibra. Su formación está asociada con la expulsión de hidrogeno (h_2) durante la fermentación. Este hidrogeno es el principal sustrato utilizado por las arqueas metanogénicas, esta tiene la función para reducir el CO_2 dando paso a la metanogenesis. Correlacionado directamente a un aumento en la producción de acetato también lo será el de emisiones ce CH_4 entérico (Moss et al., 2000)

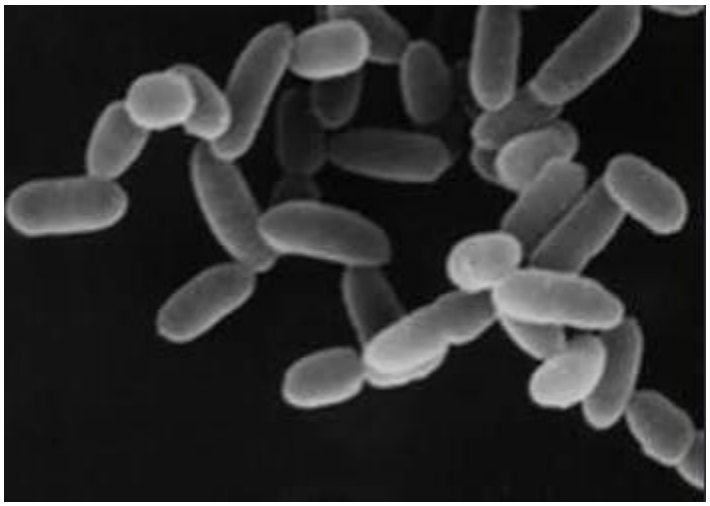


Figura 6 Arqueas Metanogénicas a nivel microscópico

Fuente: CHRYSTEYNS, 2018

Por otro lado, la formación de propionato actúa como una vía competitiva por el H_2 disponible en el rumen. Durante su degradación, el H_2 es incorporado en la molécula de propionato, disminuyendo la cantidad de H_2 libre y que puede ser utilizada por los microorganismos metanogénicos para producir metano. Todo esto en consecuencia, hay un aumento considerable en la proporción de propionato y esta suele asociarse con una reducción de las emisiones de CH_4, razón por la cual diversas estrategias nutricionales buscan favorecer esta vía fermentativa (Ungerfeld, 2020)

En términos de metanogenesis, el incremento del butirato puede contribuir uno de los indicadores en la fermentación ruminal y permite inferir el potencial de producción de CH_4 Todo esto en conjunto actúa de manera que si hay una mayor relación acetato asociado con una mayor cantidad de H_2.

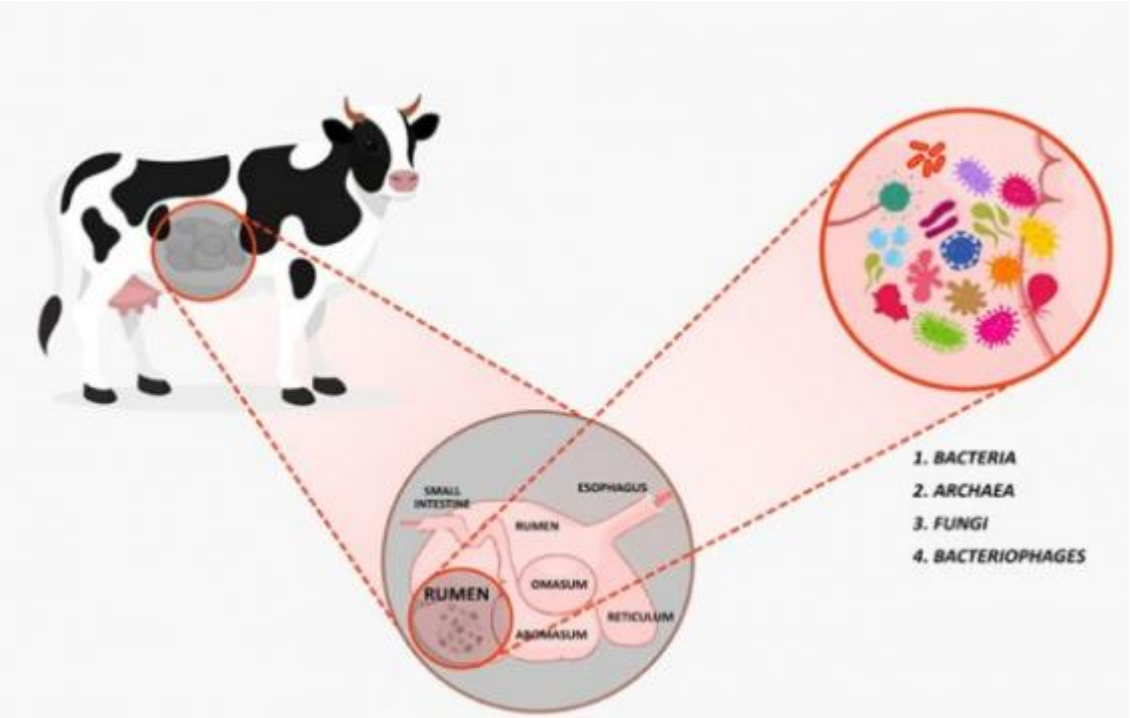


Figura 11 Bacterias del rumen encargadas de la metanogenesis

FUENTE: El blog del CFGS de ganadería y asistencia en sanidad animal

6.7. Taninos y flavonoides

Los taninos y flavonoides son metabolitos secundarios presentes en diversas especies vegetales y el estudio de estas ha generado interés y sobre todo en la utilización de aditivos naturales en la alimentación de rumiantes, debido a su capacidad para modificar la fermentación ruminal y también el aprovechamiento de los nutrientes. Los taninos pueden formar complejos con proteínas y modificar la actividad de determinados microorganismos en este caso ruminales, lo que puede favorecer la utilización del nitrógeno y, dependiendo de su concentración, influir sobre la digestibilidad y el desempeño productivo (Jayanegara et al., 2012; Min et al., 2020).

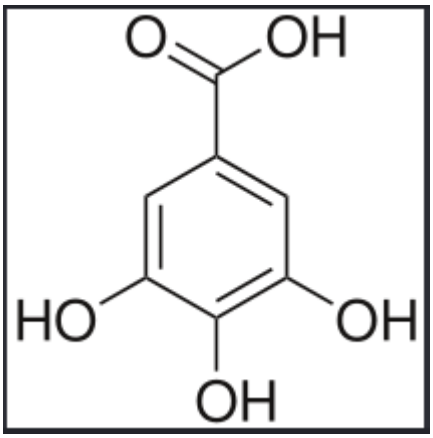


Figura 7 Estructura molecular del tanino

Por su parte, los flavonoides cuentan con propiedades antioxidantes y antimicrobianas que pueden modificar el comportamiento en la fermentación ruminal y algunos indicadores de desempeño animal. Orzuna-Orzuna et al. (2023), mediante un metaanálisis en bovinos de carne y leche, encontraron que la suplementación con flavonoides puede influir sobre el desempeño productivo, la fermentación ruminal y el estado antioxidante, aunque la respuesta depende del compuesto y del nivel de inclusión.

Una de las principales aplicaciones de estos compuestos es su potencial para disminuir la producción de CH_4 entérico. Pero los taninos pueden afectar la población microbiana ruminal y reducir la actividad de microorganismos, estos son asociados con la metanogenesis. Cardoso-Gutiérrez et al. (2021)

Entonces los taninos pueden funcionar como una alternativa de origen vegetal para modificar la microbiota ruminal y reducir la metanogenesis.

Por lo tanto, la utilización de taninos y flavonoides como aditivos en dietas para el consumo del ganado, representa una alternativa de interés para mejorar la eficiencia de la alimentación y contribuir a la mitigación de las emisiones de CH_4 en rumiantes. Sin embargo, su efecto está estrechamente relacionado con la fuente vegetal, estructura química, composición de la dieta y sobre todo la dosis de inclusión, por lo que es necesario establecer niveles que permitan reducir las emisiones sin comprometer el consumo, la digestibilidad y el desempeño productivo del animal.

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

En la presente investigación se realizó en uno de los pocos laboratorios que permite hacer mediciones de emisiones de CH_4 entérico *in vivo,* el Laboratorio de Ganadería Medio Ambiente y Energías Renovables (LAGMAER) ubicado en la Posta Zootécnica de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma del Estado de México (Figura 2), localizado en el Cerrillo Piedras Blancas, CP; 50295, Estado de México.



Figura 12 Ubicación de laboratorio, FMVyZ UAEMex

7.1. Cámaras de circuito abierto

El laboratorio de investigación tiene dos cámaras de respiración de circuito abierto, equipadas con equipo científico de la marca *Sable Systems International,* importado de Las Vegas, Nevada, EEUU, con capacidad de medición de dos animales al mismo tiempo. Cada cámara de respiración está equipada con una jaula metabólica, la cual cuenta con un bebedero, un comedero, recolectores para el depósito de heces y orina, además de aire acondicionado, un ventilador el cual tiene la función principal de mantener una codispersión de los gases emitidos por el bovino, y un ambiente estable. Por otro lado, cuenta con iluminación para la comodidad del de los operarios y poder vigilar al animal en todo momento, así mismo, cuentan con

dos puertas de acceso, al frente para poder manipular el comedero y el bebedero, y el lado trasero el acceso para los animales a la cámara como se muestra en la Figura 3.



Figura 13. Aspectos del interior de una cámara de respiración de circuito abierto del Laboratorio de Ganadería, Medio Ambiente y Energías Renovables de la FMVZ-UAEMEX.



Figura 14 Cámara ya en funcionamiento con el becerro

Esta cámara cuenta en el techo con una salida de los gases que emite el animal, la cual está conectada a través de tubos de plástico al equipo de medición. El equipo de medición está compuesto de: Filtros que separan polvo, humedad y otras impurezas que vienen en los gases, generadores de flujos de masas modelo FK2K, drierita para secar los gases que vienen de la cámara, un Multiplexor que se encarga de programar el turno de medición para cada cámara, una interface que conecta el

analizador de CH_4 con la computadora que registra las lecturas del gas, un analizador de CH_4 (Figura 4) interconectado a la computadora de escritorio, el cual tiene instalado el software ExpeData (Figura 5) con el que se capturan en tiempo real las mediciones.

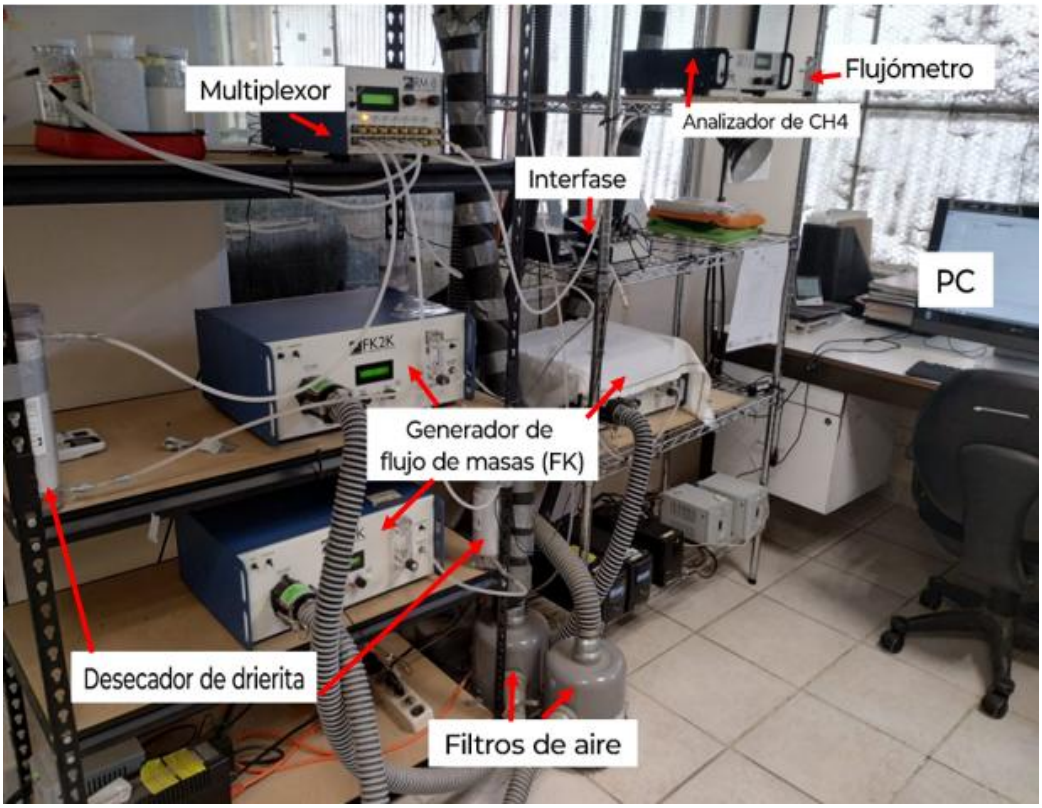


Figura 15 Equipo de análisis científico conectado a las cámaras de respiración de circuito abierto para medir las emisiones de CH_4.

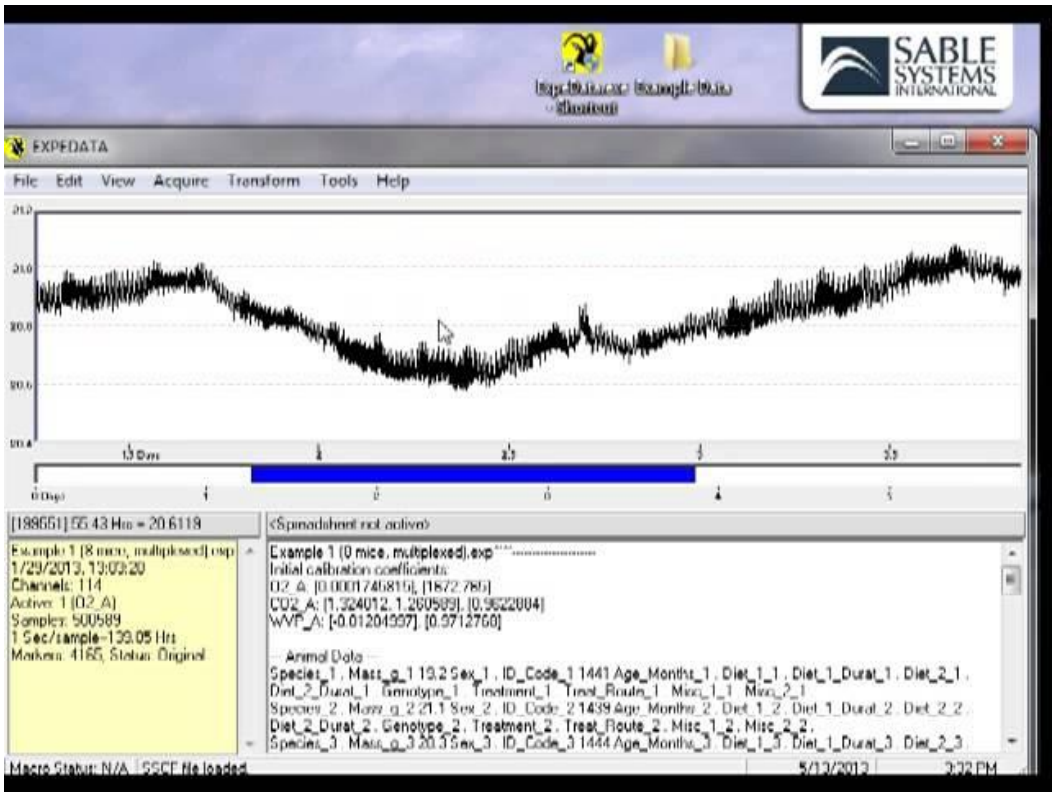


Figura 16. Imagen de Software EXPEDATA encargado de la captura y análisis de los datos de emisiones de CH_4 generados por las cámaras de respiración.

Para el uso correcto del equipo de medición, existe un manual elaborado por Vazquez-Carrillo, quien explica paso a paso para una correcta operación del equipo y la medición.

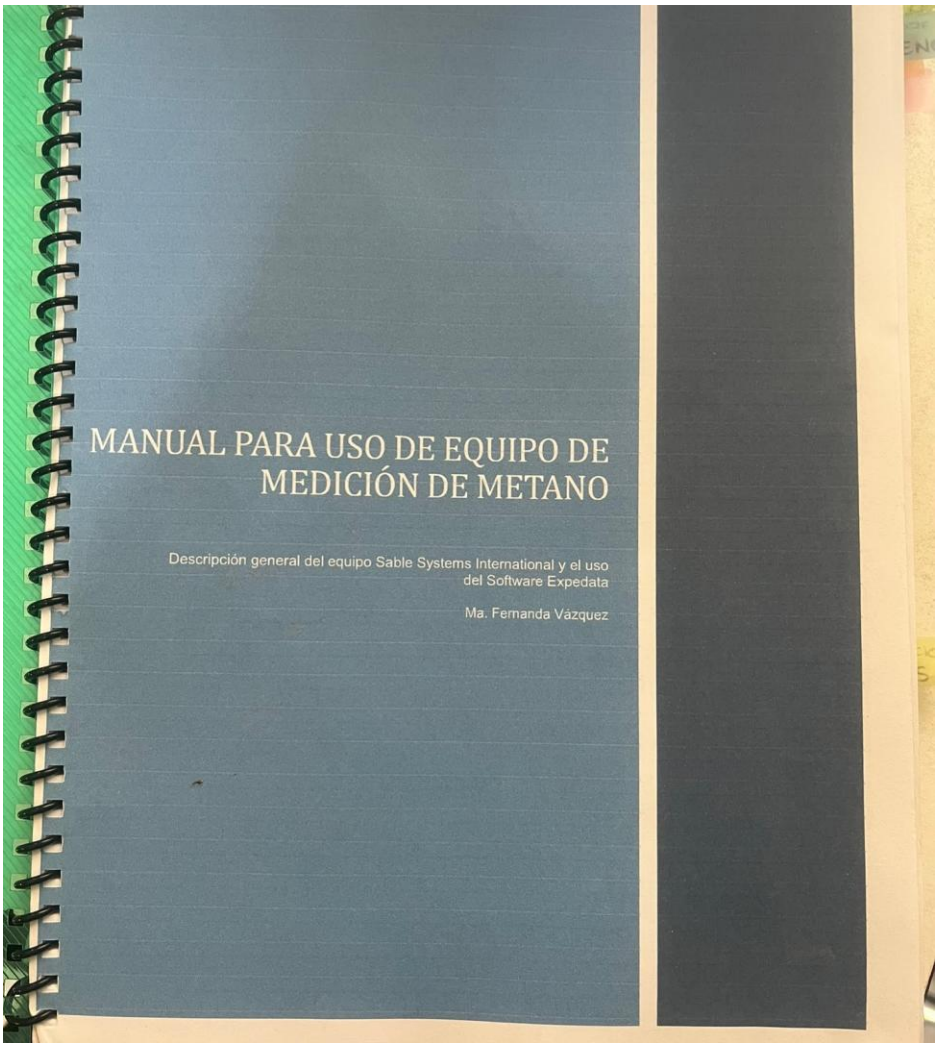


Figura 17 Manual de uso para el equipo de medición de emisiones de CH_4 por el ganado bovino.

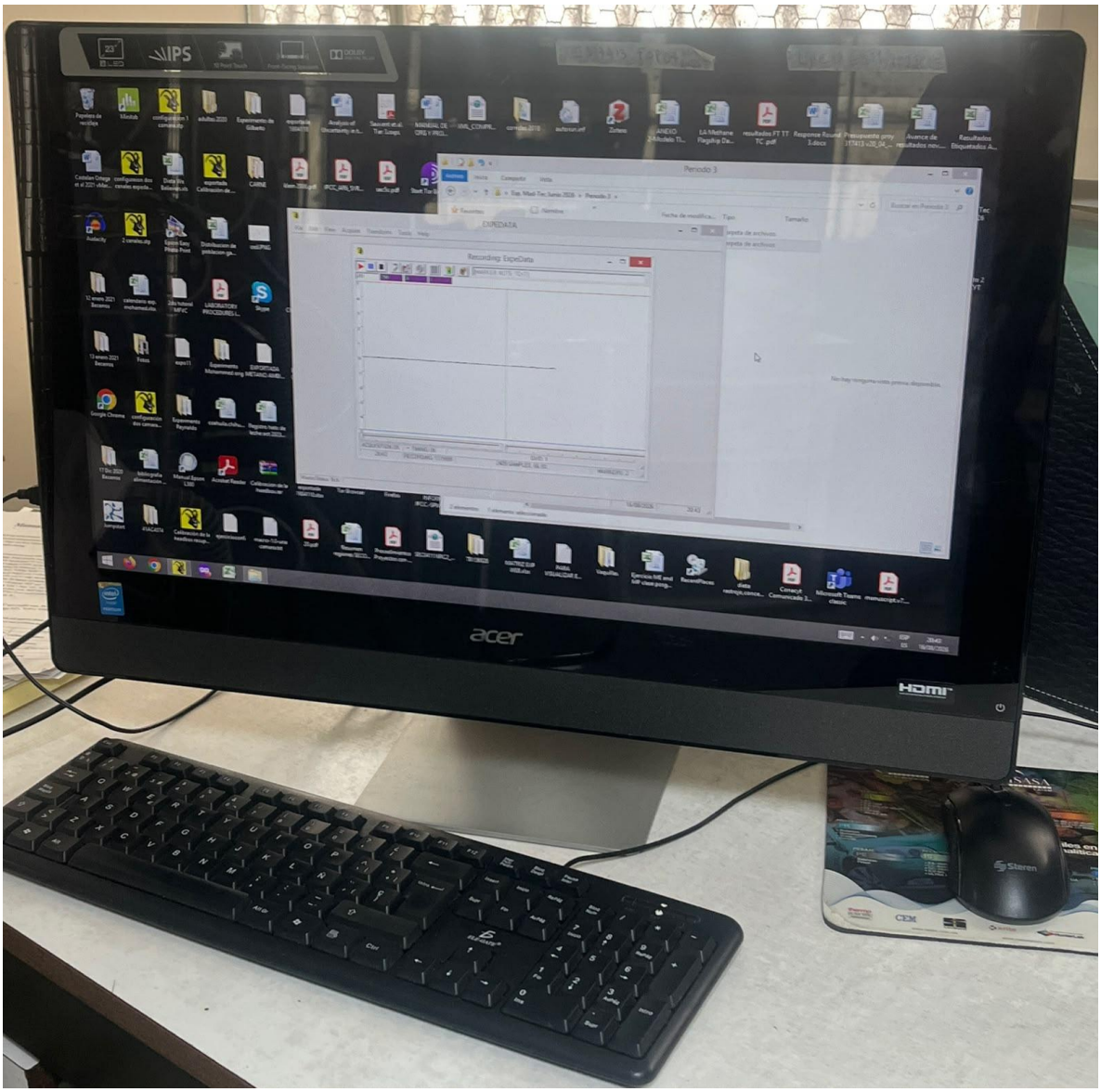


Figura 18 PC utilizado para el registro de datos

7.2. Calibración del equipo

Para llevar a cabo las mediciones, el equipo se dejó funcionando 48 horas antes para precisar las lecturas de la concentración de CH_4, haciendo énfasis en la rectificación de los filtros de aire y cada conexión para el correcto tránsito del gas, así mismo la evaluación de la drierita, siendo un mineral desecante indispensable para la medición, rectificando su uso correcto en un tono azulado y seca, (de lo contrario se tornó rosa, no apta para la medición).

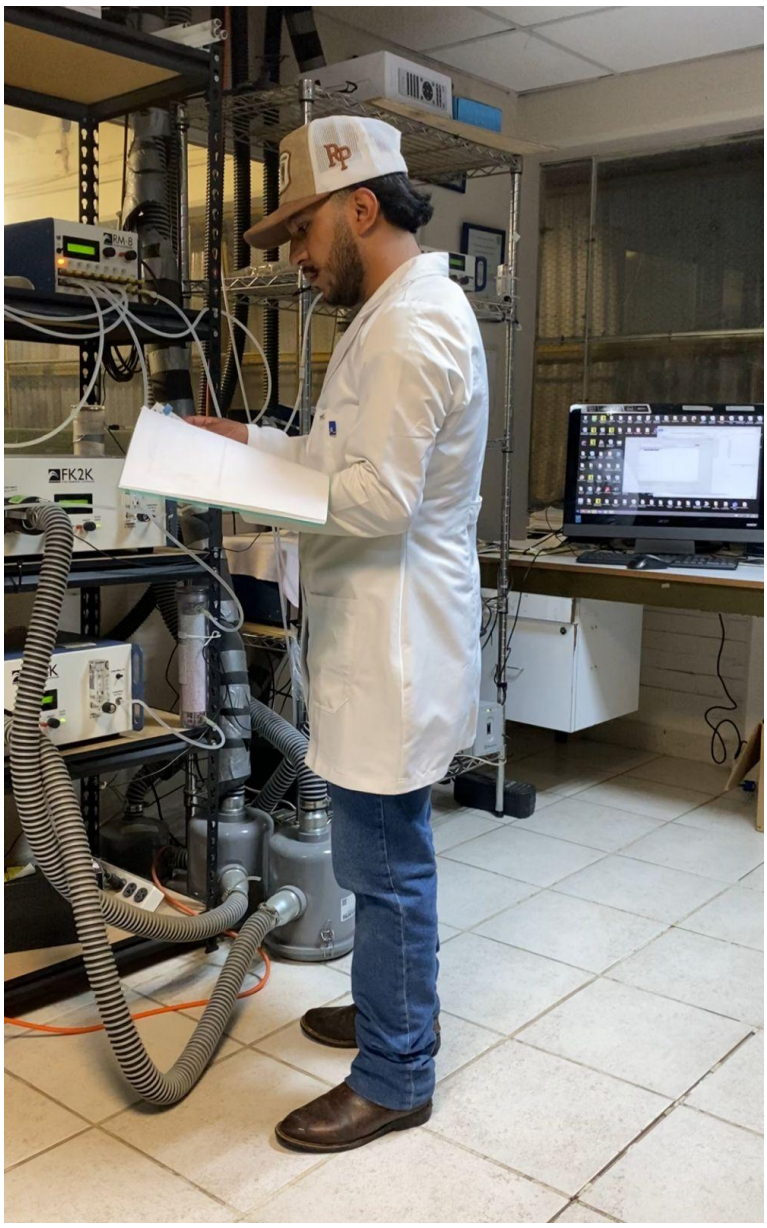


Figura 19 Calibración del equipo de medición



Figura 20 Drierita, usada como filtro para

Para el correcto análisis de los gases, es necesario que el análisis de CH_4 tenga su punto de inicio en 0.000%, para poder llegar a esto se realizó la calibración, con gas nitrógeno (N2) puro, con el fin de estabilizar el analizador, para rectificar el equipo se le pasa una mezcla de gases, el cual contiene CH_4 al 0.0099% , cuando este número fue contante es posible continuar, para regresar el analizador a 0 y poder empezar a correr las mediciones con los becerros, se le hace una última apertura a la llave de N_2, así se calibro el equipo.

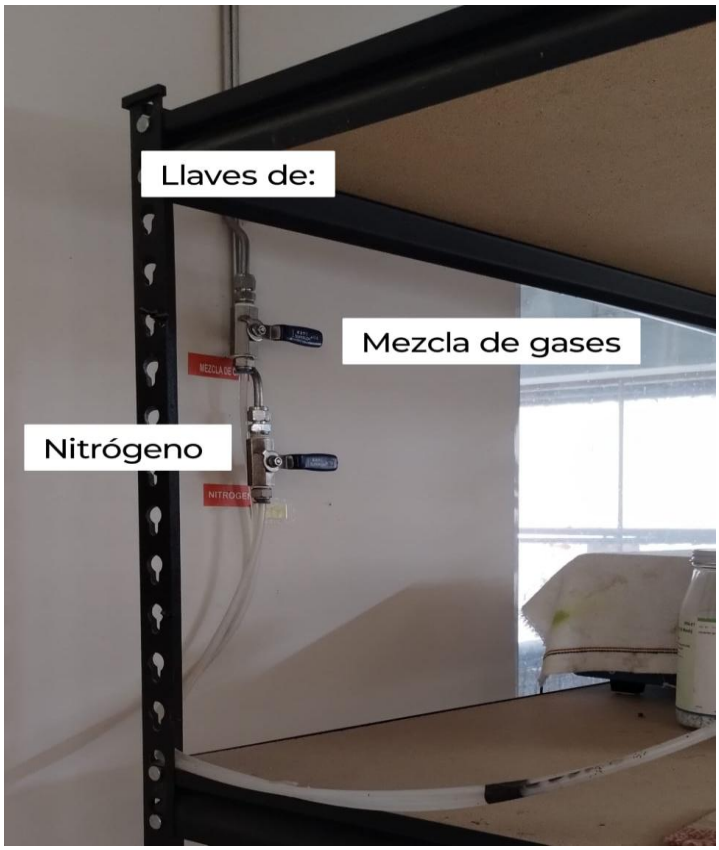


Figura 21 Llaves de mezcla de gases para calibración

7.3. Animales

El principal objetivo de estudio, fue el comportamiento ante la metanogenesis, emitida en becerros de raza Holstein, para esto, se trabajaron con 4 becerros bajo un trato digno, con un peso vivo promedio de 160± 10 kg (KdPV) promedio, y una edad de 10±7 meses.



Figura 22 Becerros Holstein utilizados para medir las emisiones de CH_4 entérico.

Previo a las mediciones, se trabajó con los becerros para poderlos adaptarlos al manejo y a las cámaras de respiración, así aminorando el estrés, que se familiaricen con el entorno, y las condiciones de las cámaras para que al momento de las mediciones se comportaran de forma normal sin afectar el consumo de alimento..

Los becerros, se ingresaron en parejas y las cámaras tuvieron en todo momento disponibilidad de agua y de comida *ad libitum,* clima controlado, periodos de descanso al aire libre (entre mediciones) indispensable para que el bienestar animal de los animales estuviera presente, y que el aprovechamiento de los tratamientos se optimizara al máximo.

7.4. Tratamientos

En base al control (concentrado elaborado) tenemos los tratamientos experimentales los cuales ofrecimos en cantidades ajustada, gramos de materia seca por día por animal (cabeza), (g MS/D/C).



Figura 23 Cirian procesado para el tratamiento

Al concentrado elaborado (control) se le adicionaron los cuatro diferentes tratamientos, con un porcentaje distinto de inclusión (Tabla 1): Cirian (*Crescentia alata Kunth*), cocoite (*Gliricidia sepium*), caulote (*Guazuma ulmifolia*) y cosmos (*Cosmos bipinnatus*).

Dónde: C= control, TB= Tratamiento b, TC= Tratamiento C, TD= Tratamiento d

Algunos de los aditivos de se mezclaron, otros actuaron solos.

Tabla 1 Tratamientos y aditivos utilizados durante el experimento, ofrecido en cada tratamiento

	C	**TB**	**TC**	**TD**
CIRIAN	0gr	0.220gr		0.110gr
COCOITE	0gr		0.175 gr	0.0875gr
CAULOTE	0gr		0.175gr	0.0875gr
COSMOS	0gr			0.124gr

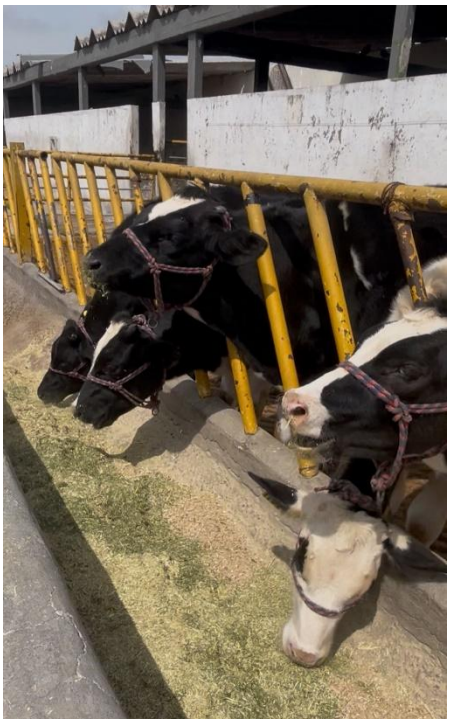


Figura 24 Becerros consumiendo el alimento

La incorporación de estos aditivos pasó por un proceso para poder ofrecerlos, tales como conservación, reducción del tamaño de partícula a un tamaño óptimo para el consumo, mediante la disminución mediante un molino, cribada (8 mm) perfectamente para el consumo óptimo de los animales.



Figura 25 Aspecto del experimento en donde se observan a dos bovinos en las cámaras de respiración de circuito abierto.

7.5. Dieta base

Los becerros fueron alimentados con una dieta base la cual se comparó con el efecto que tiene la incorporación de los aditivos y estudiar la respuesta de las emisiones de CH_4

La dieta base se elaboró a partir de dietas comúnmente utilizadas en productores, con ingredientes al alcance de los productores, la cual se muestra en la tabla 2.

Tabla 2 Concentrado elaborado ofrecido a los becerros durante el experimento

INGREDIENTES	CONSUMO (KG MS/D)	% DE INCLUSION	DOSIS DIARIA DE CONSUMO (KG MF/D)
Heno De Avena	3.1	70.45	3.41
Maiz Molido	0.5	11.36	0.57
Pasta De Soja	0.3	6.82	0.332
Salvado De Trigo	0.5	11.36	0.546
Total	4.4	100	4.882







Figuras 26, Ingredientes utilizados en la dieta base, a) rastrojo de maíz, b) pasta de soja, c)maíz molido d)salvado de trigo

Tabla 3 Composición química de la dieta base.

Ingredientes	**Contenido energético (kcal)**	**Proteínas (g)**	**Grasas totales (g)**		**Hidratos de carbono disponibles (g)**	**Fibra dietética (g)**
			Grasas saturadas	**Grasas Trans**		
Heno de avena	150	4	1	0	55	68
Maíz molido	320	9	4	0	68	9
Pasta de soja	300	46	4	0	30	12
Salvado de trigo	170	16	1	0	26	41



Figura 27 Revoltura de ingredientes para concentrado

7.5. Variables evaluadas

La principal variable evaluada fue la emisión de CH_4 entérico, comprendida como proceso microbiológico resultando del metabolismo del animal, producto del trabajo de las arqueas metanogénicas, pertenecientes al rumen, encargado del CH_4.

La cuantificación de este gas permitió determinar el efecto de los diferentes tratamientos dietéticos sobre la producción de CH_4 y estimar el factor de emisión correspondiente.

La emisión de CH_4 se expresó en gamos por día, por cada medición.

7.6. Periodo de tiempo del experimento

El experimento tuvo una duración total de 100 días, comprendido en diferentes periodos:

- Periodo de adaptación: de 15 días asignados a la dieta base más el aditivo correspondiente a cada animal
- Mediciones en cámara: 3 días (72 horas) dentro de las cámaras de respiración, para la evaluación de las emisiones.
- Periodo de limpieza: para la correcta medición del siguiente periodo se hace una limpieza del tratamiento anterior durando 3 días este proceso.



Figura 28 Manejo de becerro durante el experimento

7.8. Diseño Experimental

Se utilizó un diseño experimental de Cuadrado Latino 4 x 4, en donde cada animal pasó por cada uno de los experimentos una vez. Los resultados se analizaron mediante un análisis de varianza para un diseño de Cuadrado Latino utilizando el software estdístico Minitab versión 19.

Tabla 4. Secuencia de tratamiento asignados en el experimento con un diseño de Cuadrado latino Acomodo de diseño experimental por cuadrado latino 4x4

	P1 (21 DIAS)	**P2 (21 DIAS)**	**P3 (21 DIAS)**	**P4 (21 DIAS)**
BECERRO 1	C	TB	TC	TD
BECERRO 2	TB	TC	TD	C
BECERRO 3	TC	TD	C	TB
BECERRO 4	TD	C	TB	TC

7.9. Análisis estadístico

Los resultados en base a las emisiones de metano fueron analizados mediante la prueba estadística ANOVA que es respectivos al diseño experimental de cuadrado latino.

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + T_j + P_k + \varepsilon ijkl$$

Dónde: Y_{ijkl}es la variable de la respuesta que el i-ésimo animal (i=1, 2, 3, 4), recibió del j-ésimo tratamiento (j = 1, 2, 3, 4) durante el periodo k-ésimo (k = 1, 2, 3, 4); *μ* es la media general de todas las observaciones; A_i es el efecto aleatorio del animal; T_j son los efectos fijos del tratamiento; P_k es el efecto fijo del periodo; y *εijkl* se refiere al error experimental de todas las observaciones, supuesto independiente distribuido con media de 0 y varianza unitaria (N, I; μ = 0 , σ = 1) (Vázquez Carrillo *et al.,* 2023). Este proceso se realizó con el software MINITAP.

VIII. RESULTADOS

El cuadro 3 presenta los resultados de la emisión de CH_4, en el cual no muestra diferencias estadísticamente significativas; entre el control vs el que emitió un mayor factor de CH_4 tenemos el tratamiento D, el cual tuvo una diferencia de 3.39%, al respecto del factor de emisión más bajo registrando un 14.016% es entre el control vs tratamiento B.

Tabla 5. Resultados de las emisiones de CH4, ganancia diaria de peso (GDP) y consumo de materia seca (CMSD)

Tratamiento	ECH_4 E/G/D	GDP Kg	CMS, kg/d
TB	131.9± 24.6	0.3^{b} ± 0.2	5.8 ± 0.7
TD	148.20±13.82	1.4^{a} ± 0.5	6.3 ± 0.2
TC	139.60± 1.76	1.2^{ab} ± 0.5	5.7 ± 0.4
C	153.4± 25.6	0.5^{ab} ± 0.3	6.7 ± 0.2
Valor, P	0.311	0.030	0.214

Literales diferentes entre columnas difieren estadísticamente P < 0.01, ±= desviación estándar. ECH_4 E/G/D= Promedio de emisión de CH_4 gramos por día; GDP Kg= Ganancia de peso en kilogramos, CMDS Kg/d= Consumo de materia seca kilogramos por día.

En base a los resultados obtenidos, se observaron diferencias entre los tratamientos evaluados para GDP, los cuales fueron establecidos sobre una dieta base y la incorporación de aditivos de origen vegetal en diferentes cantidades. Estas variaciones permitieron analizar el comportamiento de los animales en relación con el consumo de MS, las emisiones de CH_4, y la ganancia de peso (GDP), con la finalidad de determinar la respuesta productiva y sobre todo ambiental ante cada tratamiento.

A partir del control, los animales presentaron un consumo de MS de 6.7 kg MS/D generando una emisión de 153.4 g de CH_4 y una GDP de 0.4 kg. Este tratamiento permitió establecer referencia para analizar el comportamiento de los animales ante los aditivos. En base a estos resultados se observó que los tratamientos suplementados presentaron variaciones tanto en el consumo de materia seca como en la emisión de CH_4 y, principalmente, en la ganancia de peso.

En cuanto al tratamiento TD, este arrojo una emisión de 148.20 g de CH_4/día, con un consumo de materia seca de 6.3 kg MS/día. Sin embargo, uno de los resultados a favor de este tratamiento fue la GDP de 1.4 kg, siendo la mayor entre los tratamientos evaluados. Esto nos indica que, aunque la reducción en la emisión de CH_4 no fue considerable respecto al tratamiento control, el comportamiento productivo de los animales fue favorable, debido a que se obtuvo una mayor GDP, con un consumo de MS menor al registrado en el control. Es decir, la intensidad de la emisión de CH_4 fue menor para este tratamiento, en otras palabras, se produjo menos CH_4 por cada kg de peso ganado por los animales.

Por su parte, el tratamiento TC presentó una emisión de 139.60 g de CH_4/día, con un consumo de 3.3 kg MS/día y una ganancia de peso de 1.1 kg. En este tratamiento se observó una menor emisión de CH_4 respecto al control, acompañada de una GDP considerablemente mayor. Esto es importante desde el punto de vista productivo, ya que demuestra que la incorporación de aditivos utilizado en este tratamiento no afectó negativamente el consumo de MS y, al mismo tiempo, permitió mantener una respuesta favorable en la ganancia de peso.

Finalmente, el tratamiento TB fue quien reporto la menor emisión de CH_4 entre los tratamientos evaluados, con una reducción de 14.02 % de CH_4 respecto al tratamiento control. Este tratamiento presentó un consumo de MS de 5.8 kg MS/día; difiriendo en la GDP fue de solamente 0.3 kg. Por lo tanto, aunque TB destacó por presentar la mayor reducción en cuanto a emisiones de CH_4, su comportamiento productivo fue inferior al observado en los tratamientos TC y TD. Esta situación permite observar que una menor emisión de CH_4 no necesariamente se relaciona de manera directa con una mayor ganancia de peso, debido a que ambas variables

pueden responder de manera diferente a las características y composición de la dieta.



Figura 29 Pesaje de becerros para obtener ganancias de pesos

IX. DISCUSIÓN

En general, el consumo de MS no evidenció diferencias significativas entre tratamientos, presentándose valores entre 5.8 y 6.7 kg MS/día. Este comportamiento indica que las inclusiones de los aditivos utilizados en el presente estudio no generaron problemas importantes en el consumo de alimento por parte de los animales.

Los resultados obtenidos son semejantes a los reportados por Hernández-Pineda (2018), quien también trabajó con *Cosmos bipinnatus* y registró consumos de materia seca entre 2.6 y 3.1 kg/día, valores ligeramente inferiores a los obtenidos en el presente estudio. A pesar de esta diferencia, ambos estudios muestran que la utilización de recursos vegetales puede mantener niveles adecuados de consumo, siempre que su inclusión dentro de la dieta se realice de manera adecuada.

Respecto a las emisiones de CH_4, aunque no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos suplementados y el tratamiento control, sí se identificó una tendencia hacia la disminución de las emisiones en los animales que recibieron los aditivos.

La disminución observada en TB puede estar relacionada con la presencia de compuestos como taninos y flavonoides, los cuales pueden modificar la actividad de los microorganismos presentes en el rumen y, particularmente, influir sobre la actividad de las arqueas metanogénicas responsables de la producción de CH_4. En este sentido, Hernández-Pineda (2018) reportó una reducción cercana al 16 %, resultado similar al obtenido en el presente estudio. Sin embargo, la reducción observada fue inferior a la reportada por Vázquez-Carrillo et al. (2020), quienes encontraron disminuciones de entre 27.6 y 32.5 %. Estas diferencias pueden estar relacionadas con el tipo de recurso vegetal empleado, la cantidad incluida en la dieta y la concentración de compuestos secundarios presentes.

No obstante, uno de los aspectos de mayor interés zootécnico correspondió a la GDP. Si bien la reducción de CH_4 constituye un aspecto importante desde el punto de vista ambiental, dentro de los sistemas de producción animal también es necesario considerar el desempeño productivo de los animales. En este sentido, el

tratamiento TB, a pesar de presentar la mayor reducción en las emisiones de CH_4, solamente registró una ganancia de peso de 0.3 kg. Por el contrario, los tratamientos TC y TD presentaron ganancias de peso de 1.2 y 1.4 kg, respectivamente, lo que representa una respuesta productiva más favorable.

Asimismo, al considerar la emisión de CH_4 en relación con la cantidad de peso producido, los tratamientos TC y TD presentaron valores de aproximadamente 128.2.0 y 139.9 g de CH_4 por kilogramo de peso producido (intensidad de la emisión), respectivamente. Esto permite observar que, aunque estos tratamientos no presentaron la mayor reducción absoluta de CH_4, sí mostraron una mayor eficiencia productiva, debido a que lograron mayores ganancias de peso sin incrementar de manera importante las emisiones.

Estos resultados concuerdan con lo señalado por la FAO (2019) y Ku-Vera et al. (2018), quienes destacan la importancia de mejorar la eficiencia productiva de los sistemas ganaderos como una estrategia para disminuir la intensidad de las emisiones de GEI. De esta manera, la incorporación estratégica de recursos forrajeros de origen vegetal puede contribuir no solamente a la reducción de las emisiones de CH_4, sino también a mantener una respuesta productiva satisfactoria.

En conjunto, los resultados obtenidos muestran que los tratamientos evaluados tuvieron diferentes respuestas sobre las variables productivas y ambientales. El tratamiento TB destacó por presentar la mayor reducción de CH_4, mientras que TC y TD mostraron un comportamiento más favorable en cuanto a ganancia de peso y eficiencia productiva. Por lo tanto, la utilización de recursos vegetales como parte de la alimentación de los animales puede representar una alternativa de interés para disminuir la intensidad de las emisiones de CH_4, siempre considerando que su incorporación debe mantener un equilibrio entre la mitigación de gases de efecto invernadero y el desempeño productivo de los animales.

X. CONCLUSIONES

En el presente estudio, con enfoque a la evaluación en emisiones de CH_4 presentaron una reducción significativa en los tratamientos con respecto al control por lo tanto el tratamiento B TB resulto ser más eficiente ante las reducción en cuanto a emisiones de CH_4 por lo tanto con aditivos de origen vegetal se consigue una alternativa ante los niveles de CH_4, con esta práctica y estos datos, podemos hacer un aporte significativo a los inventarios nacionales y tener una alternativa sustentable por parte de la ganadería.

XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilera, E., Piñero, P., Infante Amate, J. U.A.N., Gonzales de Molina, M.A.N.U.E.L., Lasaletta, L., & Sanz Cobeña, A.L.B.E.R.T.O. (2020). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistema agroalimentario y huella de carbono de la alimentación en España. *Real Academia de Ingenieria,* 2020, vol 35. P. 43-55

Angeles-Hernandez, J. C., Ku-Vera, J.C., Vázquez-Carrillo, M. F., Castelán-Ortega, O. A. (2024). Analysis of spatially distributed enteric methane emissions from cattle across the geo-climatic regions of Mexico and uncertainty assessment. *Atmospheric Environment,* 322, 3-7.

Ballesteros, H. B., & Aristizabal, G. L. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el, cambio climático. *Instituto de hidrología, meteorología Y Estudios Ambientales- IDEAM. Subdirección de meteorología (Bogotá Colombia).* P 2-5, 11-15.

Carmona J. 2005. *El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo*, Revista colombiana de ciencias pecuarias vol. 18 no. 1. Medellín Jan./Apr.

Church, D. C. (1993). El rumiante fisiología digestiva y nutrición. P. 142-143, 151-152

Cruz-Matias, C., Aviles-Nova, F., Nahed-Toral., J., Herrera-Camacho, J., Trujillo-Vazquez, R. J., Gonzales- Ronquillo, M., & Castelan-Ortega, O. A. (2016). Use of tropical legume tree and coffee pulp to reduce enteric methane emission by cattle fed a low-quality forage diet. Agriculture , 16(2), 153.

Garza, G. (210). La transformación urbana de México, 1970-2020. *Los grandes problemas de México*, 2010, vol. 2, P. 13-27.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Climate change 2021: *The physical science basis.* Contribution of working Group I to the sixth assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University.

Janssen, P. H. (2010). Influence of hydrogen on rumen methane formation and fermentation balances through microbial growth kinetics and fermentation thermodynamics. Animal Feed Science and Technology, 160(1–2), 1–22.

KU-Vera, J. C., Valencia-Salazar, S. S., Pineiro-Vazquez, A. T., Molina Botero, I. C., Arroyave-Jaramillo, J., Montoya-Flores, M. D., …& Solorio-Snachez, F. J. (2018). Determination of methane yield in cattle fed tropical grasses as measured in opend circuit respiration chambers. *Agricultural and forest metereology*, 2018, vol. 258.

KU-Vera, J. C., Castelan- Ortega, O. A., Galindo-Maldonado, F. A., Arango, J., Chirinda, N., Jimenez-Ocampo, R., …& Solorio-Sanchez, F. J. (2020). Strategies for enteric methane mitigation in cattle fed tropical forages. Animal, 14(S3), s453-s463.

Manrique, V. Efectos del Metano, sobre el cambio climático, *Estado del arte y escenario de reducción.* P. 29-32

Moss, A. R., Jouany, J. P., & Newbold, J. (2000). Methane production by ruminants: Its contribution to global warming. Annales de Zootechnie, 49(3), 231–253.

MULLER, Adrián; CRUZ Jaime. La importancia de la ganadería para la agroecología y los sistemas de alimentación sostenibles. *Revista Colombiana de zootecnia* 2016, vol., 2 no. 4

Orzuna-Orzuna, J. F., Dorantes-Iturbide, G., Lara-Bueno, A., Chay-Canul, A. J., Miranda-Romero, L. A., & Mendoza-Martínez, G. D. (2023). Meta-analysis of flavonoids use into beef and dairy cattle diet: Performance, antioxidant status, ruminal fermentation, meat quality, and milk composition. *Frontiers in veterinary science*, 10, 1134925.

Pineda, G. S. H., Beltran, P, E, P,. Benaouda, M., Gracia, J. M.P, Nova, F. A., Molina, L., & Ortega, O. A. C. (2018). Pithecellobium dulce, Tagetes erecta and Cosmos bipinnatus on reducing enteric methane emission by dairy cows. Ciencia rural 20182,vol. 48,no 10, p. e20170484

Rahmantillah, R. s., Ramdani, D., Hermaman, I., Jayanegara, A., & Yanza, y. R. (2024) Exploring multiple impacts of dietary tea supplements on ruminants: A meta-analysis. Adv. Anim. Vet. Sci. Sci, 12 (10), 1924-1931

Relling, A. E., & Mattioli, G. A. (2003). Fisiología digestiva y metabólica de los rumiantes. *Argentina: UNLP Editorial Edulp, 23-55, P 18-28*

Salem, A. Z. M., González, J. S., López, S., Ranilla, M. J., Rojo, R., Camacho, L. M., & Avilés, F. (2009). Impactos y adaptaciones de los taninos en los rumiantes, In 1 *Simposio internacional sobre Producción Animal. Universidad Autónoma ciudad de México, P. 100-118.*

SENASICA, Impacto económico de la producción de bovinos para carne y leche en México ante el riesgo de dispersión del virus de la estomatitis vesicular VS, enero 2025.

Ungerfeld, E. M. (2020). Metabolic hydrogen flows in rumen fermentation: Principles and possibilities of interventions. Frontiers in Microbiology, 11, 589.

Van Soest, P. J. (1994). Nutritional Ecology of the Ruminant (2nd ed.). Cornell University Press.

Vargas, J., Cárdenas, E., Pabón, M., & Carulla, J. (2012). Emisión de metano entérico en rumiantes en pastoreo**.** Archivos de Zootecnia, 61, 51–66.

Vázquez Carrillo M., Zaragoza-Guerrero, R., Corona-Gochi, L., González-Ronquillo, M., Castillo-Gallegos, E., & Castelán-Ortega, O. A. (2023). Evaluación del efecto de Cymbopogon citratus sobre el consumo, digestibilidad, emisión de metano y partición de la energía en bovinos en crecimiento. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, *31*, 207-212.

Vázquez-Carrillo, M. F., Ku-Vera, J. C., González –Ronquillo, M., Castillo-gallegos, e., Kebrea, 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, 2020, 4(1), 13-26

Velázquez, E. E. (2021). Actividad Ganadera y contaminación ambiental. In *Anales de la Real Academia de Doctores de España.* (Vol. 6. No.2 pp 245-260) Real Academia de Doctores de España.