

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

CENTRO UNIVERSITARIO UAEM TEMASCALTEPEC

INGENIERO AGRÓNOMO ZOOTECNISTA

TESIS

DETERMINACIÓN DE LA PARTICIÓN DE LA ENERGÍA BRUTA EN BECERROS EN CRECIMIENTO CON UNA DIETA COMPLEMENTADA CON CUATRO ADITIVOS DIFERENTES

PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO AGRÓNOMO ZOOTECNISTA

PRESENTA:

JOHANN ARTURO MORALES MARTINEZ

ASESOR

DR. OCTAVIO ALONSO CASTELAN ORTEGA

CO-ASESORA

DRA. FRANCISCA AVILÉS NOVA

TEMASCALTEPEC, MEXICO 2026

INDICE

RESUMEN 7
I.INTRODUCCIÓN 8
IREVISIÓN DE LITERATURA 10
2.1. Fisiología del tracto digestivo de los bovinos 10
2.2. Saliva 10
2.3. Esófago 11
2.4. Microorganismos del rumen 11
2.5. Rumia 12
2.6. Digestión fermentativa requiere del desarrollo del estómago del rumiante 13
2.7. Consumo voluntario y digestibilidad 14
2.8. Métodos para determinar la partición de la energía en los bovinos 16
2.9. La energía digestible y digestibilidad 16
2.10. Principales técnicas utilizadas 17
2.11. Evaluación genética de eficiencia energética 17
III. JUSTIFICACIÓN 20
IV. HIPÓTESIS 21
V. OBJETIVO 22
2.1. General 22
2.2. Específicos 22
VI. METODOLOGÍA 23
6.1. Localización 23
6.2. Equipo de medición 23
6.3. Animales experimentales 26
6.4. Dietas experimentales 28
6.5. Obtención de muestras de alimentos. 31
6.6. Determinación de ms 33
6.7. Proceso para la determinación de MS 34
6.9. Adición de la muestra: 34
6.10. Secado: 34
6.11. Enfriamiento en desecador: 35
6.12. Determinación de materia seca (MS) en heces: 35
6.13. Determinación de la partición de la energía bruta. 38
6.14. Diseño experimental 39

6.15. Manejo y medición de $CH4$ 40
6.16. Diseño experimental 44
6.17 Análisis de resultados: 46
VII RESULTADOS 47
7.1. Emisión de metano 47
7.2. Consumo de materia seca 48
7.3. Producción de heces. 48
7.4. Ganancia de peso 49
7.5. Consumo de energía bruta. 49
7.6. Factor qm y el factor Ym. 50
7.7. Digestibilidad de la energía bruta. 51
VIII. DISCUSIÓN 52
IX. CONCLUSIONES 64
X. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA 66

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Composición de la dieta experimental expresada en porcentaje de cada ingrediente en materia seca (MS) 31
Cuadro 2: Tratamientos experimentales con la descripción y cantidades de los aditivos 31
Cuadro 3: Tratamientos experimentales 44
Cuadro 4: Diseño experimental 4 x 4 44
Cuadro 6: Consumo de materia seca (CMS kg/d), digestibilidad de la materia seca (DMS, %) y consumo de materia seca por día (CMSD kg.) 48
Cuadro 7: Producción de heces registrados durante el experimento. 48
Cuadro 8: Ganancia de peso expresado en kilogramos (GDP, kg.) 49
Cuadro 9: Consumo de energía bruta expresada en mega julios (Consumo GE, MJ/d). 49
Cuadro 10: Factor qm y el factor Ym 50
Cuadro 11: Digestibilidad de la energía bruta obtenida del experimento 51

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Cámaras de respiración de circuito abierto. 24
Ilustración 2: Interior de cámaras de respiración de circuito abierto. 25
Ilustración 3:Complementos del sistema de medición de $CH4$ 26
Ilustración 4: Becerros de la raza Holstein utilizados como unidades experimentales. 27
Ilustración 5: Distribución y manejo de los animales durante los periodos del Cuadrado Latino. ... 28
Ilustración 6: Homogeneización y revoltura manual de los ingredientes y aditivos de la dieta experimental. 29
Ilustración 7: Ingredientes basales utilizados en la formulación de la ración total mezclada (TMR). 30
Ilustración 8: Obtención y preparación de muestras de alimentos para análisis bromatológico. 32
Ilustración 9: Procedimiento de recolección, pesaje y homogeneización del alimento rechazado en cámaras de medición de CH_4 33
Ilustración 10: Colocación y distribución uniforme de la muestra en la estufa de secado a 105 °C. 35
Ilustración 11: Almacenamiento y preservación de las muestras de heces procesadas. 36
Ilustración 12: Recolección y pesaje del total de las heces excretadas durante el periodo experimental 37
Ilustración 13: Distribución de la alícuota (10% del total) en la charola para el análisis de materia seca (MS) 38
Ilustración 14: Administración individual de los tratamientos alimenticios a los becerros en crecimiento (Vista general) 39
Ilustración 15: Detalle del manejo y dosificación individual de los aditivos en los comederos 40
Ilustración 16: Manejo y pesaje de los animales durante el inicio del periodo de adaptación 41
Ilustración 17: Alimentación controlada y suministro gradual del concentrado en los corraletas experimentales 42
Ilustración 18: 43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Anatomía de los compartimientos preestomacales y estomacales del bovino. 14

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue calcular la partición de la energía bruta consumida (EBC) por, la densidad energética, metabolicidad de la dieta (qm), y el factor de partición de la energía que se dirige hacia el metano (Ym) en bovinos en crecimiento, mediante la técnica de cámaras de respiración de circuito abierto. Se utilizaron cuatro becerros de 160 ± 10 kg de peso promedio, distribuidos en un diseño experimental de cuadrado latino 4 × 4, con los siguientes tratamientos: A) 100% concentrado experimental; B) con 14% de Cirian + 86% de concentrado; C) con 10% de Cocoite + 10% Caulote + 80% de concentrado; D) con 6% de Cirian + 5% de Cocoite + 5% Caulote + 7% de Cosmos + 77% de concentrado. Se evaluó el consumo de materia seca (CMS), digestibilidad, Ym y el rendimiento de metano ($g\,kg^{-1}$ de CMS), Los datos se sometieron a un análisis de varianza con el fin de poder identificar diferencias significativas ($P < 0.05$). De acuerdo con los resultados obtenidos, el tratamiento D permitió un uso más eficiente de la EBC tras el proceso de partición de la energía; planteándose como la alternativa más viable para tener un mayor rendimiento metabólico.

I. INTRODUCCIÓN

El conocer la partición y utilización de la energía de los alimentos dentro del cuerpo de los bovinos es un factor fundamental para el desarrollo de mejores estrategias de nutrición y alimentación, ya que el desconocer esta información puede ser un factor limitante para lograr ganancias de peso adecuadas en los bovinos de carne al no satisfacer las necesidades nutricionales (Posada-Ochoa *et al.,* 2017).

Para determinar la partición de la energía dentro del cuerpo de los bovinos, es necesario utilizar técnicas calorimétricas específicas, así como ensayos metabólicos y análisis comparativos (Storm *et al.,* 2012).

El método más utilizado es a través de cámaras de respiración de circuito abierto. Este método permite determinar las necesidades energéticas del ejemplar participante mediante cálculos precisos del gasto energético y metabólico del individuo. Por lo tanto, es posible retomar muestras durante determinados lapsos de tiempo tanto del aire de entrada como del de salida, permitiendo la cuantificación de oxígeno consumido (O_2), dióxido de carbono producido (CO_2) y metano emitido (CH_4) en cada uno de los periodos evaluados (Storm *et al.,* 2012).

Para calcular las necesidades diarias de energía y poder predecir el balance general de la energía (Galyean *et al.,* 2016), es necesario contar con una base de datos de la composición química y aporte nutricional, en especial del contenido de energía bruta de la dieta, de cada uno de los ingredientes utilizados dentro de las dietas, considerando primordialmente sus aportes de energía metabolizable y proteica (Vázquez-Carrillo *et al.,* 2021).

En México existe muy poca información sobre el consumo y partición de la energía consumida por los bovinos en crecimiento, ya que hasta hace pocos años no se contaba con cámaras de respiración en donde se podía determinar la digestibilidad de la materia seca y la emisión de CH_4; sin embargo, hoy en día es posible llevar a cabo esta medición en México mediante las cámaras de respiración de circuito abierto de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma del Estado de México. Por lo tanto, el

objetivo del presente estudio es determinación de la partición de la energía bruta en becerros en crecimiento con una dieta complementada con cuatro aditivos diferentes.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Fisiología del tracto digestivo de los bovinos

Anatomía y Fisiología del Aparato Digestivo de los Rumiantes

La primera parte del conducto alimenticio está conformada por la boca, que se encuentra compuesta por la lengua y los dientes. La lengua sale de la boca, rodea el pasto y luego lo atrae hacia el interior de la boca. La dentadura de los rumiantes no cuenta con caninos ni incisivos en el maxilar superior, los cuales están reemplazados por una almohadilla dentaria o rodete maxilar corneo (Molina Santiago,2021), esto facilita la aprehensión de los forrajes durante el pastoreo.

2.2. Saliva

La saliva es secretada por distintos tipos de glándulas (parótidas, molares, bucales, palatinas, sublingual, submaxilar, labial y faríngea). Es posible clasificarlas según el tipo de secreción en mucígenas y alcalígenas. La función de la secreción mucilaginosa es humedecer el bolo alimenticio, lo que facilita la masticación y la deglución. Por otro lado, la saliva alcalina, que se encuentra conformada primordialmente por carbonatos, bicarbonatos y fosfatos, se encarga de regular y mantener el pH del rumen en un rango estrecho, cercano a la neutralidad, actuando como el principal sistema amortiguador ante la acumulación de ácidos grasos volátiles (Aldrovandi, 2020).

Además, la saliva contiene urea, lo que permite mantener el nivel de nitrógeno constante en el rumen. Se estima que la secreción salival en bovinos oscila entre 90 y 190 litros por día, dependiendo de la dieta y de acuerdo con distintos autores como (Molina Santiago,2021).

Ligeras presiones mecánicas en las paredes del retículo-rumen actúan como un estímulo receptor que incrementa el flujo y la secreción salival; sin embargo, presiones intraruminales elevadas y sostenidas, como las que ocurren clínicamente durante el meteorismo o empaste,

generan una respuesta inhibitoria de dicha secreción debido a la sobre distensión de los mecanorreceptores (Molina Santiago, 2021).

2.3. Esófago

El bolo alimenticio deglutido pasa junto con la saliva a la faringe, que es un pasaje común para las vías respiratorias y digestivas, y luego baja al estómago mediante su paso por el esófago. El esófago es un órgano tubular musculo membranoso que se encarga de unir la faringe con los cardias estomacales. En bovinos adultos, su longitud es de aproximadamente 0.90 a 1.05 metros y cuenta con un diámetro de 5 a 7 centímetros. Estructuralmente está conformado por tres capas túnicas (mucosa, muscular y adventicia); la túnica muscular intermedia, compuesta predominantemente por fibras estriadas a lo largo de toda su extensión en los rumiantes, se encarga de producir las ondas peristálticas que facilitan tanto el traslado del bolo alimenticio hacia el retículo-rumen como el proceso inverso durante la regurgitación de la rumia (Molina Santiago, 2021).

2.4. Microorganismos del rumen

Las bacterias y protozoarios son esenciales en el rumen, aunque las bacterias son de las más importantes y su concentración puede llegar a cien mil millones por centímetro cúbico. La concentración y el tipo de bacterias dependen de la dieta, ya que se encuentra una gran diversidad de especies, por lo que su porcentaje varía considerablemente (Zebeli *et al.,* 2020).

El rumen es considerado como una enorme cuba de fermentación, con un ambiente de temperatura constante, 39°C, y 1°C más que la temperatura del animal debido al calor desprendido por la fermentación y anaerobiosis, que se refiere a la exclusión del aire por los gases producidos por la fermentación principalmente CO_2 y CH_4 (Zebeli *et al.,* 2020).

La acidez es más variable debido a que los productos finales de la labor bacteriana son ácidos grasos volátiles (acéticos, propiónico y butírico), los cuales son neutralizados por la saliva en diferentes grados y dependiendo de la composición de la dieta, así una dieta rica en forrajes produce una fermentación más cercana a la neutralidad, mientras que una dieta rica en granos y alimentos concentrados origina un Ph ruminal más ácido (Zebeli *et al.,* 2020).

2.5. Rumia

La rumia es la función fisiológica característica de los rumiantes, la cual consiste en la regurgitación de la digesta acumulada desde el compartimiento retículo-ruminal hacia la cavidad bucal. Para desencadenar este proceso, es indispensable un estímulo mecánico provocado por el contacto de partículas de fibra gruesa sobre los mecanorrecetores de la pared ruminal; esto induce una contracción reticular extra que antecede al ciclo normal de mezcla bifásico (Guglielmotti *et al.,* 2023).

Esta dinámica genera una elevación del material digerido por encima del nivel del cardias, facilitando la aspiración del bolo alimenticio mediante una presión intratorácica negativa producida por una inspiración con la glotis cerrada. De este modo, se regurgita un bolo que promedia los 130 gramos (compuesto por una fracción sólida y un contenido líquido). El proceso de remasticación de cada bolo oscila entre 25 y 60 segundos, requiriendo de 30 a 80 golpes masticatorios laterales u horizontales, los cuales son distintivos de la cinemática mandibular en estos animales (Guglielmotti *et al.,* 2023).

Una vez transcurrido este lapso, el bolo vuelve a ser deglutido hacia el complejo retículo-rumen, donde continúa la degradación enzimática por parte de la microbiota microbiana. Los periodos de rumia suelen presentarse de manera intermitente en lapsos cortos de 20 a 50 minutos (pudiendo prolongarse hasta los 90 minutos bajo ciertas condiciones) y se manifiestan principalmente en las horas posteriores a la ingesta alimenticia. El patrón dietario influye directamente en el tiempo total diario dedicado a la rumia, el cual experimenta una reducción significativa cuando los animales consumen dietas con altas proporciones de granos y carbohidratos no estructurales debido a la menor estimulación física de la fibra (Guglielmotti *et al.,* 2023).

Finalmente, la degradación de los componentes nutricionales en este sistema se lleva a cabo mediante un proceso de digestión fermentativa anaerobia y no por acción de enzimas de origen endógeno; esta actividad bioquímica es ejecutada por el consorcio de microorganismos simbiontes (bacterias, protozoarios y hongos) alojados en los compartimientos preestomacales (Guglielmotti *et al.,* 2023).

Por lo tanto, se debe considerar que la nutrición de los rumiantes implica, en primera instancia, proveer los sustratos necesarios para satisfacer los requerimientos de la microbiota ruminal. Para que estos microorganismos logren colonizar y desarrollarse eficientemente, el hospedador debe garantizar un ambiente óptimo y una estrecha relación de simbiosis en el ecosistema ruminal; esto demanda un aporte equilibrado y sincrónico de energía (carbohidratos fermentables) y nitrógeno (proteína degradable en rumen) que permita a los microbios maximizar sus procesos metabólicos y la síntesis de proteína microbial (Guglielmotti et al., 2023).

La digestión fermentativa permite degradar hidratos de carbono estructurales, de la misma manera tiene efectos sobre la digestión de todos los ingredientes de la dieta debido a que están expuestos a los mismos procesos fermentativos (Guglielmotti et al., 2023).

2.6. Digestión fermentativa requiere del desarrollo del estómago del rumiante

El rumen es capaz de ocupar hasta el 75% de la cavidad abdominal y en conjunto con su contenido constituyen el 30% del peso vivo del animal. Se encuentra dividida en cuatro cavidades: el retículo (red o redecilla), el rumen (panza), el omaso (librillo) y el abomaso (cuajar). Este último se caracteriza por ser glandular y funcionalmente análogo al estómago de los no-rumiantes sin embargo los demás se encuentran protegidos por un epitelio queratinizado y escasean de glándulas (Relling & Mattioli 2020).

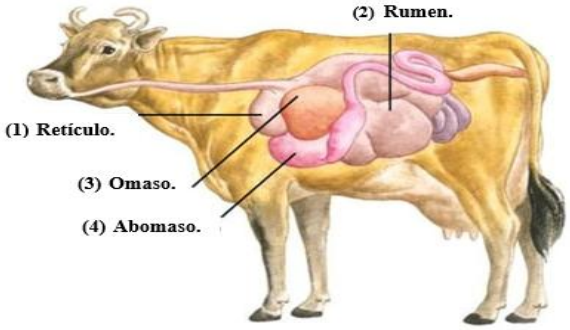


Figura 1: Anatomía de los compartimientos preestomacales y estomacales del bovino. Nota. Adaptado de Manual de ganadería bovina (p. 24), por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2011.

(1) El retículo cuenta con la disposición en forma de red de los pliegues de su mucosa y se encuentra ubicado cranealmente por lo tanto entra en contacto con el diafragma, teniendo comunicación con el rumen atreves del pliegue retículo-ruminal esto los transforma en una solo unidad funcional (retículo-rumen).

(2) El rumen es una de las cavidades más grandes la cual está en contacto con la pared abdominal izquierda.

(3) El omaso se encuentra a la derecha de la red se caracteriza por tener una forma esférica. Logra comunicarse con la red mediante el esfínter retículo- omasal y con el abomaso mediante el esfínter omaso- obomasal. El cuerpo está compuesto por un número indeterminado de hojas o laminas, que implantadas en la curvatura mayor del omaso guían su borde libre hacia el canal del omaso, el cual se encuentra en su curvatura menor y permite la comunicación entre ambos esfínteres.

(4) El abomaso se sitúa a la derecha y ventralmente en la cavidad abdominal, se identifica por tener la forma de un saco alargado con un extremo ciego denominado fundus y un extremo pilórico que desboca en el duodeno (Relling & Mattioli 2020).

2.7. Consumo voluntario y digestibilidad

El consumo voluntario de materia seca (MS), de forrajes se encuentra condicionado a causa de la distención que resulta de la efusión restringida por la digestión mediante el tracto gástrico. La capacidad del animal para el llenado se relaciona con su peso vivo y el volumen

del alimento que se encargan de provocar la distensión, sin embargo, la estabilidad liquida del contenido del rumen es de alrededor del 12 a 18% de MS, la cual es mantenida por la salivación continua que se encarga de amortiguar el pH del medio. La ingesta de alimentos fibrosos disminuye el consumo voluntario de los rumiantes mediante una interacción compleja entre planta-animal. Los elementos del animal se encuentran extensamente valorados debido a que se encargan de controlar la carga de ingesta dentro del rumen, y que solo pequeñas partículas, consigan salir del rumen hacia el tracto posterior (Troncoso, 2020).

Las preferencias por consumir algún alimento no dependen de un solo factor debido a que es una mezcla de diferentes estímulos, de aditivos preseleccionados influye el color, la textura, la estructura y su contenido de humedad (Troncoso, 2020).

Los factores químicos que también pueden llegar a influir son: el aroma (los olores), primordialmente el sabor todo esto puede llegar afectar directamente el consumo voluntario de distintas maneras, al conocer: la velocidad de consumo, el tamaño del bocado, masticación, la rumia, y el flujo de la ingesta a través del TGI (NASEM,2021).

La rumia y la masticación es de acuerdo con el tipo de alimento, aumenta cuando se trata de los tallos de los forrajes, que, para las hojas y las partes más tiernas, sin embargo, esta se extiende con la edad de los forrajes (Mertens, 2021).

Aun no se ha definido completamente en base a estudios y experimentos realizados con animales, si la velocidad de pasaje y el consumo voluntario se encuentran limitados por el tiempo del desdoblamiento de las partículas de mayor tamaño o se afecta más por la dificultad de las partículas pequeñas para pasar del rumen (Troncoso, 2020).

Las características anatómicas de las hojas y los tallos de las plantas, de gramíneas o leguminosas, que se desarrollan en ambientes tropicales en comparación con ambientes templados son analizados para valorar su influencia sobre los patrones y la facilidad de degradación en base a las características de la fibra de las partículas. La estructura epidérmica y vasculares de las plantas, así como la acción microbiana, se encarga de determinar desdoblamiento de los componentes de las plantas, los cuales tiene un mayor un porcentaje de asimilación en las hojas de las leguminosas (Castelán-Ortega *et al.*, 2023).

2.8. Métodos para determinar la partición de la energía en los bovinos

Las leyes de la termodinámica se emplean a los animales domésticos vivos en las unidades de producción. Los altos precio de alimentación en el ganado (más del 70% de todos los costos variables de producción) se relaciona con la eficiencia y producción de los alimentos utilizados para el mantenimiento y crecimiento (Maina *et al.,* 2022).

Por lo tanto, es importante saber identificar las etapas en donde es posible disminuir la perdida de energía con la finalidad de obtener mayor beneficio en los bovinos y sus productos. Es importante mencionar que existe una enorme variación fenotípica y genética al momento de determinar la eficiencia alimenticia, así como la conversión del alimento, el consumo voluntario, la eficiencia de la ganancia de peso y su crecimiento (Berry *et al.,* 2022).

2.9. La energía digestible y digestibilidad

La energía digestible aparente (ED) se define como la energía consumida menos la energía perdida en las heces (EH):

ED = consumo de EB – EH

Tomando en cuenta esta relación, todos aquellos factores que influyen en la alimentación de los bovinos que tienen influencia sobre la digestibilidad por lo tanto tienen impacto sobre el consumo de energía digestible La digestibilidad puede ser afectada por el nivel del consumo y por la relación de competencia que se presenta entra la tasa de digestión y la tasa de pasaje (Guglielmotti *et al.,* 2023) por lo tanto, los factores tanto en la dieta como ambientales que afectan o alteran el consumo, pueden tener implicaciones en el aporte de energía digestible de la dieta.

La partición y utilización de la energía bruta de los alimentos es un factor fundamental, pero al mismo tiempo puede ser un factor limitante para la ganancia de peso en bovinos de carne al no satisfacer las necesidades nutricionales (Posada-Ochoa *et al.,* 2017). Para determinar la partición de la energía, es necesario utilizar técnicas específicas, así como ensayos metabólicos y análisis comparativos.

2.10. Principales técnicas utilizadas

Análisis de Energía Retenida por estimación.

Esta técnica se caracteriza por considerar el balance energético y la regresión estadística. Su principal finalidad es calcular la eficiencia con la que un animal logra transformar la energía metabolizable ingerida (MEI) en energía retenida (RE), en forma de grasa o proteína corporal. Por lo tanto, es posible valorar la eficiencia del uso de la energía, partición de la energía y los requerimientos de mantenimiento (Duarte *et al.*, 2022). Cámaras de respiración o jaulas metabólicas.

Es un método importante para el estudio del balance energético y metabolismo en animales, específicamente en rumiantes, además permite calcular de manera exacta el intercambio de gases que existe, (O_2 consumido, CO_2 y CH_4 producidos) por cada uno de los animales estudiados, por lo tanto, es posible determinar la energía utilizada y perdida mediante el metabolismo (Duarte *et al.*, 2022).

2.11. Evaluación genética de eficiencia energética

La metodología se cimienta en modelos bioestadísticos de regresión genética y evaluación genómica con el fin de determinar la variación en la partición y retención de la energía, por lo tanto, permite reconocer y seleccionar a los animales más eficientes en la utilización de la energía a nivel individual, todo esto con la finalidad de mejorar genéticamente la eficiencia y su capacidad alimenticia dentro de las poblaciones determinadas (Siqueira *et al.*, 2024).

Para calcular las necesidades diarias de energía y poder predecir el balance neto general de la energía en el organismo (Duarte *et al.*, 2022), es necesario contar con una base de datos de la composición química y aporte nutricional de cada uno de los ingredientes utilizados dentro de las dietas considerando primordialmente sus aportes de energía metabolizable y proteica (Vázquez-Carrillo *et al.*, 2021).

La energía bruta (EB) es el contenido total de energía química que constituye a un alimento. Se determina mediante una calorimetría de combustión en una bomba de calorimétrica la cual permite medir la cantidad de calor liberado por el alimento analizado. Esto valor

representa el punto de partida para la evaluación energética de los alimentos, sin embargo, (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine [NASEM], 2021)

La partición de la energía bruta (EB) hacia la energía digestible (ED) continúa un proceso que toma en cuenta la fisiología del animal como la fermentación ruminal. En rumiantes, una determinada parte de la energía se pierde en la energía fecal (EF) lo cual se debe a:

- Digestión incompleta de fibras.
- Efectividad limitada de aprovechamiento del alimento fibroso.

La energía digestible (ED) se calcula de la siguiente manera:

$$ED = EB - EF$$

Esta energía expresa la fracción realmente absorbida en el tracto gastrointestinal, sin embargo, es importante mencionar que no toda esta energía se encuentra disponible para el metabolismo del animal (NASEM, 2021)

La energía digestible (ED) en rumiantes no se puede ser utilizada totalmente por el animal, ya que continúan las pérdidas de energía en forma de orina, y gases de fermentación principalmente metano (CH_4).

Formula de partición:

$$EM = ED - (\text{Perdidas en gases} + \text{Perdidas en orina})$$

Estas pérdidas se desarrollan después de la absorción de nutrientes por lo tanto al restarlas de la ED, se obtiene la energía metabolizable (EM) (NASEM, 2021).

La energía metabolizable (EM) es la cantidad de energía que el animal puede utilizar para poder realizar sus funciones vitales y para la producción tanto de leche como de carne, una vez que se eliminó las perdidas en heces, gases de fermentación y orina. Una determinada parte de esta energía se pierde como calor durante el desarrollo de los procesos metabólico.

Formula de partición:

$$EN = EM - \text{Perdidas por calor (calor incrementado o HI)}$$

Es el calor que se produce durante:

- La digestión, absorción y metabolismo de los nutrientes.
- La fermentación microbiana en el rumen.
- La síntesis y descomposición de proteínas, lípidos, etc.

Estas pérdidas no favorecen directamente al mantenimiento o producción, pero son inevitables (Duarte *et al.*, 2022).

La energía neta ha sido determinada empíricamente para determinados ingredientes, debido a la relación entre ED y EM estas pueden variar de acuerdo con la calidad de los ingredientes utilizados para la elaboración de la dieta (Galyean *et al.*, 2016).

Asimismo, conociendo los cambios o alteraciones que se pueden llegar a presentar durante el proceso de partición de la energía en el animal se tiene la oportunidad de buscar alternativas relacionadas con el manejo nutricional las cuales permiten disminuir las perdidas dentro del sistema del animal, por lo tanto, se aumenta la cantidad de energía del alimento retenida en productos como leche o carne (Mendoza *et al.*, 2008; Kongphitee *et al.*, 2018).

III. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto de investigación se realiza en base a la necesidad actual de optimizar la eficiencia en el uso de plantas nativas consideradas como aditivos dentro de los sistemas de producción de carne incluyéndolos dentro de las dietas.

Las emisiones de CH_4 entérico producido por los bovinos contribuyen al calentamiento global de manera significativa, ya que del total de la emisión de este gas por el sector agropecuario del 64 al 78% se origina por la fermentación entérica de los bovinos a nivel mundial (Ángeles-Hernández *et al.*, 2024) por lo tanto son la fuente antropogénica de este gas, el cual tiene 28 veces la capacidad del CO_2 para inducir calentamiento de la superficie terrestre. En México los bovinos contribuyen con el 75% de las emisiones de CH_4 del sector agropecuario.

IV. HIPÓTESIS

La complementación de la dieta base con cuatro aditivos diferentes de regiones tropicales modifica y permite determinar la partición de la Energía Bruta (EB) consumida por bovinos en crecimiento a partir de la digestibilidad EB, el Consumo de la Materia Seca (CMS) y la emisión de metano (CH_4).

V. OBJETIVO

2.1. General

- Determinar y comparar el efecto de la suplementación con cuatro aditivos diferentes sobre la partición de la energía bruta en becerros en crecimiento, con el fin de identificar cuál de ellos optimiza la eficiencia de utilización de la energía.

2.2. Específicos

- Determinar el efecto del Cirian (*Cresentia alata*) sobre la partición de la energía bruta en becerros en crecimiento.
- Determinar el efecto del Caulote (*Guazuma ulmifolia*) sobre la partición de la energía bruta en becerros en crecimiento.
- Determinar el efecto del Cocoite (*Gliricidia sepium*) sobre la partición de la energía bruta en becerros en crecimiento.
- Determinar el efecto del Cosmos (*Cosmos bipinnatus*) sobre la partición de la energía bruta en becerros en crecimiento.

VI. METODOLOGÍA

6.1. Localización del área experimental.

El experimento se realizó en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UAEMEX (FMVZ) en la posta zootécnica dentro de los laboratorios de ganadería y medio ambiente (LABGMA). La ubicación es El Cerrillo, Piedras Blancas; Toluca, Estado de México, localizado en las coordenadas 19°17′02″N y 99°40′41″O (INEGI, 2020).

6.2. Equipo de medición

El Laboratorio de Investigación en Ganadería, Medio Ambiente y Energías Renovables cuenta con tres cámaras de respiración de circuito abierto (Ilustración 1), las cuales están conformadas por puertas delanteras y traseras, así como por una válvula que permite el ingreso de aire en la parte superior de cada cámara. Además, disponen de un ventilador que favorece la dispersión homogénea de los gases, un sistema de aire acondicionado complementado con un deshumidificador, iluminación artificial tanto en el interior como en el exterior, y cámaras de video vigilancia que permiten un monitoreo continuo de los animales (Ilustración 2).



Ilustración 1: Cámaras de respiración de circuito abierto.



Ilustración 2: Interior de cámaras de respiración de circuito abierto.

Las cámaras de respiración de circuito abierto son dispositivos que permiten medir la digestibilidad de la materia seca y la emisión de CH_4 principalmente en rumiantes, como en este caso, donde se trabajó con bovinos. Antes de comenzar con las mediciones, las cámaras deben estar en perfectas condiciones de limpieza y libres de humedad, ya que estos factores pueden dañar el equipo de medición o alterar las mediciones registradas durante algún período, lo que implicaría repetir el proceso. El sistema de medición complementario (Ilustración 3) está compuesto por dos generadores de flujo de masas modelo FK2K, un analizador de metano por infrarrojo cercano modelo MA-10, un multiplexor (RM-8) y una interface modelo UI-2. Este sistema de medición se encuentra conectado a una computadora de escritorio, lo que permite el registro de los datos obtenidos de las mediciones, para mayor detalle de descripción de las cámaras de respiración consultar (Castelán-Ortega *et al.*, 2020).



Ilustración 3:Complementos del sistema de medición de CH_4

Todo el sistema pertenece a la marca Sable Systems International (Las Vegas, EE. UU.). Antes de cada medición, se calibró el analizador de CH_4. Primero, se introdujo nitrógeno de alta pureza (N2, Praxair Inc.) hasta que la pantalla marcó 0.000%. Posteriormente se inyectó una mezcla de gases con una concentración de CH_4 (0.099%). Una vez que el analizador indico dicha concentración, se consideró que el equipo estaba correctamente equilibrado.

6.3. Animales experimentales

Se emplearon 4 becerros de 160 ± 10 kg (Ilustración 4); de peso vivo promedio de raza Holstein, que es una raza que se caracteriza por ser dóciles, fáciles de manejar, cuentan con una gran capacidad para adaptarse a diferentes condiciones climáticas, Los cuatro animales

se distribuyeron en un diseño experimental de cuadrado latino 4 x 4 (Ilustración 5) , implementando 4 tratamientos: tratamiento A 100% concentrado (TA), tratamiento B con 14% de Cirian + 86% de concentrado (TB), tratamiento C con 10% de Cocoite + 10% Caulote + 80% de concentrado (TC), tratamientos D con 6% de Cirian + 5% de Cocoite + 5% Caulote + 7% de Cosmos + 77% de concentrado (TD).



Ilustración 4: Becerros de la raza Holstein utilizados como unidades experimentales.



Ilustración 5: Distribución y manejo de los animales durante los periodos del Cuadrado Latino.

6.4. Dietas experimentales

En el Cuadro 1 se detalla la composición de la dieta base (Ilustración 6) la ración total mezclada (TMR) considerado en de cada uno de los tratamientos estuvo compuesto por heno de avena, empleado por ser una excelente fuente de fibra, la cual esencial para estimular la rumia y beneficiar el buen funcionamiento del rumen; maíz molido, ya que es un ingrediente de vital importancia por su alto contenido energético; pasta de soja, incorporada, por ser una

fuente de proteína de alta calidad, con un contenido bruta que oscila entre 44% y 48% ; y salvado de trigo incluido, por su buena palatabilidad y aporte complementario de nutrientes, la cual cumple con las necesidades de energía y proteína metabolizable según el (AFRC, 1993) para cubrir los requerimientos nutricionales de bovinos para mantenimiento y crecimiento. Los aditivos utilizados fueron Gliricidia sepium (Gs), Guazuma ulmifolia (Gu), Cosmos bipinnatus (Cb), y Crescentia alata (Ca).



Ilustración 6: Homogeneización y revoltura manual de los ingredientes y aditivos de la dieta experimental.



Ilustración 7: Ingredientes basales utilizados en la formulación de la ración total mezclada (TMR).

Tratamientos: El Cuadro 2 presenta los tratamientos utilizados con las dosis de *Gliricidia sepium* (Gs), *Guazuma ulmifolia* (Gu), *Cosmos bipinnatus* (Cb), y *Crescentia alata* (Ca) proporcionados diariamente, una vez que se integraron y mezclaron de manera homogénea con el concentrado. Con la finalidad de garantizar el consumo total de cada una de las plantas, todos los tratamientos se ofrecieron en la mañana estando presente en cada momento hasta que el animal lograra consumir el 100% de su tratamiento correspondiente, por lo tanto, no

existió rechazo en ninguno de los tratamientos tomando en cuenta que los animales tuvieron libre acceso al agua.

Cuadro 1: Composición de la dieta experimental expresada en porcentaje de cada ingrediente en materia seca (MS)

Ingredientes	**%**
Heno de avena	70.46
Maíz molido	11.36
Pasta de soja	6.82
Salvado de trigo	11.36
Total	100 %

Cuadro 2: Tratamientos experimentales con la descripción y cantidades de los aditivos

Tratamientos	**Kg MS/cabeza/día**
Control (dieta base sin aditivos)	0.0
Ca	0.220
Gs + Gu	0.175 + 0.175
Gs + Gu + Cb + Ca	0.87 + 0.87 + 0.124 + 0.110

Clave: Crescentia alata (Ca), Gliricidia sepium (Gs), Guazuma ulmifolia (Gu), Cosmos bipinnatus (Cb).

6.5. Obtención de muestras de alimentos

Durante la elaboración de este alimento balanceado, es fundamental recolectar una muestra representativa, conocida como alícuota, de cada uno de los ingredientes previamente mencionados, así como del suplemento una vez que todos sus componentes se hayan mezclado de manera homogénea. Todo esto con la finalidad de poder realizar análisis químicos, biológicos y nutricionales que garanticen la calidad del alimento ofrecido (Ilustración 8).

Después de tomar las alícuotas, es necesario que pasen por un proceso de secado en la estufa de secado. Como primer paso, es importante etiquetarla con un número de muestra para poder identificarla y llevar un registro en la bitácora.

Luego, se coloca la alícuota dentro de una bolsa de papel, asegurándonos de que la muestra esté bien distribuida y sin sobresaturar la bolsa, con la finalidad de que exista un buen proceso de secado. Se procede al pesado de la bolsa con la muestra y se registra el peso total. Antes de introducir la muestra en la estufa, esta debe ajustarse a 60 °C para preservar compuestos nitrogenados solubles. Posteriormente, se coloca la bolsa en una bandeja o rejilla dentro de la estufa, procurando que no tenga contacto con las paredes internas.

La muestra debe permanecer en la estufa durante un lapso determinado, que puede ser de 48 horas o hasta alcanzar un peso constante, después de concluir todo este proceso las muestras obtenidas son enviadas a laboratorios especializados en realizar los análisis requeridos.



Ilustración 8: Obtención y preparación de muestras de alimentos para análisis bromatológico.

6.6. Determinación de materia seca

Es necesario obtener una alícuota representativa del alimento rechazado durante el proceso de medición de metano (CH_4) en las cámaras. Para ello, se debe recolectar, al término de cada periodo experimental, el total del alimento rechazado presente en el comedero integrado a las cámaras de medición (Ilustración 9). Una vez recolectado, el rechazo se pesa utilizando una báscula para obtener el peso total. Posteriormente, el alimento es homogenizado para tomar el 10% del rechazo, para la determinación de materia seca (MS).



Ilustración 9: Procedimiento de recolección, pesaje y homogeneización del alimento rechazado en cámaras de medición de **CH_4**

6.7. Proceso para la determinación de MS

Es importante limpiar y secar correctamente las charolas de aluminio empleadas para el almacenamiento e ingreso de las muestras a la estufa. Asimismo, es indispensable etiquetar o marcar cada una de las charolas utilizadas, con el propósito de facilitar su identificación y permitiendo un adecuado control durante todo el proceso experimental. Una vez que las charolas estén listas es necesario pesarlas a través de una balanza analítica y registrar su peso (P1).

6.9. Adición de la muestra

Se deposita una porción representativa de la muestra homogénea del alimento dentro de la charola de aluminio, la cual puede ser de 5 o 10 g, según los requerimientos del procedimiento. Posteriormente, se pesa la charola con la muestra para registrar el segundo peso (P2).

6.10. Secado

Para continuar con el análisis, se introduce la charola con la muestra en la estufa de secado (Ilustración 10), pero antes ajustamos la temperatura a 105°C, donde permanecerá durante 12 a 24 horas. Es importante asegurarse que la muestra está distribuida completamente por toda la charola para garantizar un secado uniforme.



Ilustración 10: Colocación y distribución uniforme de la muestra en la estufa de secado a 105 °C

6.11. Enfriamiento en desecador

Una vez transcurrido el tiempo de secado, se retira la charola de la estufa y se coloca de inmediato en un desecador para enfriarla a temperatura ambiente, evitando que la muestra absorba humedad. Cuando la muestra este completamente fría, se pesa nuevamente la charola con la muestra seca y se registrar el peso final (P3).

Fórmula para calcular la pérdida de humedad:

$$\text{Porcentaje de humedad} = \left(\frac{P2-P3}{P2-P1}\right) \text{ x } 100$$

Es el 10% del rechazo MS 105° 2 horas o hasta llegar a peso constante entre muestra.

6.12. Determinación de materia seca (MS) en heces

Para poder determinar la materia seca en heces, se recolecto el 95% o 100% de las heces excretadas durante el periodo de medición (Ilustración 11). Una vez recolectadas en un recipiente con suficiente capacidad, pesar y registrar el peso total de las heces, para después proseguir a mezclar el material recolectado. De esta manera, es posible tomar una muestra representativa equivalente al 10% del total.

Una vez obtenida esta alícuota, se coloca de forma uniforme en la charola correspondiente (Ilustración 12). A partir de este punto, el procedimiento para determinar la materia seca (MS) y el posterior almacenamiento de las muestras (Ilustración 13) sigue exactamente el mismo protocolo desarrollado para el análisis del alimento rechazado.



Ilustración 11: Almacenamiento y preservación de las muestras de heces procesadas.



Ilustración 12: Recolección y pesaje del total de las heces excretadas durante el periodo experimental

.



Ilustración 13: Distribución de la alícuota (10% del total) en la charola para el análisis de materia seca (MS)

6.13. Determinación de la partición de la energía bruta

Se enviaron a analizar al laboratorio de nutrición animal de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma de Yucatán las muestras de concentrado, forrajes y heces con el fin de determinar el contenido energético.

El contenido de energía bruta del concentrado, forraje y heces se determinó mediante una bomba calorimétrica adiabática. Los resultados analíticos obtenidos originalmente en calorías por gramo (cal/g) fueron transformados a Megajulios por kilogramo de materia seca (MJ/kg M) utilizando el factor de conversión de 4.184 J por cada caloría.

No se recolecto orina por lo tanto su contenido energético se evalúo en base a los niveles de alimentación

6.14. Diseño experimental

Los tratamientos se administraron de manera individual (Ilustración 14 y 15) a 4 becerros de 160 ± 10 kg de peso vivo promedio los cuales se distribuyeron completamente al azar bajo un diseño experimental de cuadrado latino de 4x4 los resultados fueron analizados mediante un ANOVA para un diseño experimental de cuadrado latino utilizando el software MINITAB.



Ilustración 14: Administración individual de los tratamientos alimenticios a los becerros en crecimiento (Vista general)



Ilustración 15: Detalle del manejo y dosificación individual de los aditivos en los comederos

6.15. Manejo y medición de CH_4

Previamente al inicio del experimento, los animales pasarán por un período de adaptación de 21 días (Ilustración 16 y 17)., durante el cual se realizaron cambios graduales y controlados tantos en la cantidad de concentrado ofrecidos. El objetivo de esta fase fue minimizar el estrés, así como reducir el riesgo de presentar trastornos digestivos, como acidosis ruminal o timpanismo. Asimismo, se buscó maximizar la eficiencia de la ganancia de peso al tener un

consumo del 100% de la ración ofrecida a cada animal. Esto permitió evaluar de manera exacta las emisiones de CH_4 correspondientes a cada individuo y tratamiento establecido (Ilustración 18).



Ilustración 16: Manejo y pesaje de los animales durante el inicio del periodo de adaptación



Ilustración 17: Alimentación controlada y suministro gradual del concentrado en los corraletas experimentales



Ilustración 18: Monitoreo y medición de las emisiones de metano (CH_4)entérico por individuo

Además, los animales tuvieron un acercamiento precedente a las cámaras de medición, las cuales se encuentran aproximadamente a 150 metros del corral donde están estabulados donde permanecerán durante lapsos cortos de tiempo. Esto les permitió reconocer el espacio como un lugar seguro y tranquilo, lo que facilitó su manejo al momento de trasladarlos a la ubicación donde se encontraban las cámaras de medición. Como resultado, tuvieron una reacción favorable durante la duración de cada uno de los períodos de medición. Una vez que los animales pasaron por el periodo de adaptación de manera positiva a los tratamientos y al espacio de trabajo, se dio comienzo al experimento.

6.16. Diseño experimental.

La duración del experimento fue de 84 días, ya que está compuesto por 4 periodos de 21 días cada uno. Los primeros 14 días de cada periodo fueron destinados a que el animal se adapte al tratamiento asignado, de acuerdo con el diseño experimental cuadrado latino 4 x 4.

Cuadrado latino 4 x 4.

Tratamientos experimentales en g MS/día/cabeza

Cuadro 3: Tratamientos experimentales

	TA	**TB**	**TC**	**TD**
Cirian	0	0.220		0.110
Cocoite	0		0.175	0.0875
Caulote	0		0.175	0.0875
Cosmos	0			0.124

Tratamiento A 100% concentrado (TA); Tratamiento B con 14% de Cirian + 86% de concentrado (TB); Tratamiento C con 10% de Cocoite + 10% Caulote + 80% de concentrado (TC); Tratamiento D con 6% de Cirian + 5% de Cocoite + 5%

Cuadro 4: Diseño experimental 4 x 4

Identificación del animal	**P1 (21 días)**	**P2 (21 días)**	**P3 (21 días)**	**P4 (21 días)**
Rafita	C	TB	TC	TD
Jacinto	TB	TC	TD	C
Vicente	TC	TD	C	TB

Titán	TD	C	TB	TC

Tras finalizar el periodo de adaptación, se dio comienzo con el proceso de medición, el cual tendrá una duración tres días (72 h.), con evaluaciones a intervalos de 24 horas. Durante cada intervalo, es necesario que el animal consuma el 100% de su tratamiento, previamente pesado y mezclado. Posteriormente se suministrará un forraje de buena calidad y baja digestibilidad con el objetivo de complementar la dieta. Esta estrategia permite cuantificar con precisión la cantidad de alimento rechazado.

Durante cada intervalo evaluado, se permitirá la salida de los ejemplares a un espacio abierto, con el propósito de recolectar las heces excretadas y el alimento rechazado localizado dentro de las cámaras. Estos datos son fundamentales para la determinación de digestibilidad individual de cada animal.

Una vez recolectadas las muestras representativas y haber registrado los datos correspondientes, se procede con la limpieza y preparación de cada una de las cámaras experimentales. Este proceso incluye la colocación del tratamiento asignado en el comedero, limpieza del bebedero y la instalación de los recolectores de heces y orina.

Concluido el periodo de medición, se implementará un periodo de limpieza y lavado que tiene una duración de 4 días en el que los animales únicamente consumirán concentrado. Esta fase tiene como objetivo eliminar los posibles residuos de tratamientos anteriores que pudieran permanecer en el tracto digestivo de los animales y de esta forma poder iniciar con el nuevo tratamiento.

De igual manera, es importante que antes de ingresar a los animales a las cámaras, estos cuenten con el tratamiento correspondiente en su comedero individual, lo que nos permite evaluar visualmente que el animal consuma el 100% de su tratamiento. Otro factor importante es que tengan disponibilidad de agua suficiente durante todo el período de medición.

6.17 Análisis de resultados

Los resultados correspondientes a la producción de CH_4, al consumo de materia seca (CSM) y la digestibilidad de la materia seca (DMS) fueron evaluados mediante un análisis de varianza (ANOVA) para un diseño experimental de cuadro latino, utilizando el procedimiento de modelo lineal general (GLM) del programa Minitab.

VII RESULTADOS

7.1. Emisión de metano

El Cuadro 5 muestra los valores promedio de la emisión diaria de CH_4, el rendimiento de CH_4 y la intensidad de la emisión (g de CH_4/kg de ganancia de peso), registrados durante las mediciones realizadas en las cámaras de respiración a lo largo de todo el experimento. Se observa que la emisión diaria de CH_4 se redujo en un 13.8 % cuando se suministró el tratamiento que contenía Ci, mientras que el rendimiento de CH_4 aumentó en un 7.62 % al administrar el tratamiento que contenía Co + Ca. En el caso de la intensidad de la emisión (que indica la cantidad de CH_4 emitido en relación con la ganancia de peso del animal), se observaron diferencias estadísticas, con una reducción del 72.07 % al aplicar el tratamiento D en comparación con el tratamiento control que no incluye ningún aditivo. Por lo tanto, únicamente se observaron diferencias significativas en la intensidad g/CH_4 considerando un valor de (P> 0.05).

***Cuadro 5** : Emisión de CH_4, rendimiento de CH_4 e intensidad (g/CH_4) registrados durante el experimento en becerros alimentados con una dieta complementada con Cirian (Crescentia alata), Cocoite (Gliricidia sepium), Caulote (Guazuma ulmifolia) y Cosmos (Cosmos bipinnatus), administradas de forma individual y en combinación.*

Tratamiento	**Emisión CH_4**	**Rendimiento de CH_4, g CH4/kg MS**	**Intensidad, g/CH_4, g CH4/kg GDP**
TB: Ci	131.9 ± 24.6	23.13 ± 2.4	656 ± 370[a]
TD: Co+Ca+Cos+Ci	148.2 ± 13.8	23.45 ± 1.3	128.2 ± 74.8[a]
TC: Co + Ca	139.6 ± 1.7	24.70 ± 3.0	139.9 ± 60.3[b]
TA: Control	153.4 ± 25.6	22.95 ± 3.13	459 ± 310[b]
Valor de P	**0.31**	**0.269**	**0.008**

Clave: Cirian (Ci), Cocoite (Co), Caulote (Ca), Cosmos (Cos).

Tratamiento A 100% concentrado (TA); Tratamiento B con 14% de Cirian + 86% de concentrado (TB); Tratamiento C con 10% de Cocoite + 10% Caulote + 80% de concentrado (TC); Tratamiento D con 6% de Cirian + 5% de Cocoite + 5% Caulote + 7% de Cosmos + 77% de concentrado(TD).

7.2. Consumo de materia seca

El Cuadro 6 muestra los resultados obtenidos del consumo de materia seca (CMS kg/d), digestibilidad de la materia seca (DMS, %) y consumo de materia seca por día (CMSD kg.). Se observa que no existen diferencias significativas entre los tratamientos (P> 0.05).

Cuadro 5: Consumo de materia seca (CMS kg/d), digestibilidad de la materia seca (DMS, %) y consumo de materia seca por día (CMSD kg.) registrados durante el experimento en becerros alimentados con una dieta complementada con Cirian (*Crescentia alata*), Cocoite (*Gliricidia sepium*), Caulote (*Guazuma ulmifolia*) y Cosmos (*Cosmos bipinnatus*), administradas de forma individual y en combinación.

Tratamiento	CMS, kg/d	DMS, %	Consumo MSD, kg.
TB: Ci	5.8 ± 1.47	56.22 ± 0.53	3.25 ± 0.77
TD: Co+Ca+Cos+Ci	6.3 ± 0.28	52.80. ± 0.18	3.32 ± 0.23
TC: Co + Ca	5.7 ± 0.74	58.20 ± 0.27	3.32 ± 0.46
TA: Control	6.7 ± 0.61	56.25 ± 0.55	3.75 ± 0.20
Valor de P	**0.207**	**0.083**	**0.469**

Clave: Cirian (Ci), Cocoite (Co), Caulote (Ca), Cosmos (Cos).

Tratamiento A 100% concentrado (TA); Tratamiento B con 14% de Cirian + 86% de concentrado (TB); Tratamiento C con 10% de Cocoite + 10% Caulote + 80% de concentrado (TC); Tratamiento D con 6% de Cirian + 5% de Cocoite + 5% Caulote + 7% de Cosmos + 77% de concentrado(TD).

7.3. Producción de heces

El Cuadro 7 presenta la producción de heces, la cual disminuyó en un 19.94 % al aplicar el tratamiento que contenía Ci en comparación con el control. Por lo tanto, se observaron diferencias significativas (P> 0.05).

Cuadro 6: Producción de heces registrados durante el experimento en becerros alimentados con una dieta complementada con Cirian (*Crescentia alata*), Cocoite (*Gliricidia sepium*), Caulote (*Guazuma ulmifolia*) y Cosmos (*Cosmos bipinnatus*), administradas de forma individual y en combinación.

Tratamiento	Prod. Heces
TB: Ci	2.3 ± 0.53^{b}
TD: Co+Ca+Cos+Ci	3.0 ± 0.18^{a}
TC: Co + Ca	2.3 ± 0.27^{b}
TA: Control	2.9 ± 0.55^{a}
Valor de P	**0.010**

Clave: Cirian (Ci), Cocoite (Co), Caulote (Ca), Cosmos (Cos).

Tratamiento A 100% concentrado (TA); Tratamiento B con 14% de Cirian + 86% de concentrado (TB); Tratamiento C con 10% de Cocoite + 10% Caulote + 80% de concentrado (TC); Tratamiento D con 6% de Cirian + 5% de Cocoite + 5% Caulote + 7% de Cosmos + 77% de concentrado(TD).

7.4. Ganancia de peso.

En el Cuadro 8 se presentan los resultados correspondientes a la ganancia diaria de peso (GDP). Se observaron diferencias estadísticas significativas (P = 0.03) entre los tratamientos evaluados; el grupo bajo el tratamiento experimental mostró un incremento notable en la GDP, alcanzando un promedio de 0.91 kg/día, en comparación con el tratamiento control, el cual registro una ganancia de apenas 0.46 kg/día. Este comportamiento representa una duplicación en la velocidad de crecimiento de los becerros, lo que evidencia la eficiencia biológica de la dieta complementada frente a la dieta base.

Cuadro 7: Ganancia de peso expresado en kilogramos (GDP, kg.) durante el experimento en becerros alimentados con una dieta complementadacon Cirian (Crescentia alata), Cocoite (Gliricidia sepium), Caulote (Guazuma ulmifolia) y Cosmos (*Cosmos bipinnatus*), administradas de forma individul y en combinación.

Tratamiento	**GDP, kg.**
TB: Ci	0.28 ± 0.22^{b}
TD: Co+Ca+Cos+Ci	1.37 ± 0.51^{a}
TC: Co + Ca	1.15 ± 0.50^{a}
TA: Control	0.46 ± 0.27^{b}
Valor de P	**0.030**

Clave: Cirian (Ci), Cocoite (Co), Caulote (Ca), Cosmos (Cos).

Tratamiento A 100% concentrado (TA); Tratamiento B con 14% de Cirian + 86% de concentrado (TB); Tratamiento C con 10% de Cocoite + 10% Caulote + 80% de concentrado (TC); Tratamiento D con 6% de Cirian + 5% de Cocoite + 5% Caulote + 7% de Cosmos + 77% de concentrado(TD).

7.5. Consumo de energía bruta

El Cuadro 9 demuestra el consumo de energía bruta, expresado en megajulios (consumo de GE, MJ/d), el consumo de energía digestible, expresado en megajulios (consumo de ED, MJ/d), y el consumo de energía metabolizable, también expresado en megajulios (consumo de ME, MJ/d), registrados durante todo el experimento. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos (P > 0.05).

Cuadro 8: Consumo de energía bruta expresada en mega julios (Consumo GE, MJ/d), consumo de energía digestible en mega julios (Consumo ED, MJ/d) y consumo de energía digestible en mega julios (Consumo ME, MJ/d), durante el

experimento en becerros alimentados con una dieta complementada con Cirian (*Crescentia alata*), Cocoite (*Gliricidia sepium*), Caulote (*Guazuma ulmifolia*) y Cosmos (*Cosmos bipinnatus*), administradas de forma individual y en combinación.

Tratamiento	Consumo GE, MJ/d	Consumo ED, MJ/d	Consumo ME, MJ/d
TB: Ci	101.8 ± 24.4	61.49± 15.68	50.0 ± 13.8
TD: Co+Ca+Cos+Ci	113.3 ± 4.31	59.8 ± 4.95	47.1 ± 4.6
TC: Co + Ca	102.6 ± 12.38	62.3 ± 8.80	50.6 ± 8.6
TA: Control	112.8 ± 1.38	61.9 ± 2.34	48.4 ± 1.0
Valor de P	**0.336**	**0.98**	**0.93**

Clave: Cirian (Ci), Cocoite (Co), Caulote (Ca), Cosmos (Cos).

Tratamiento A 100% concentrado (TA); Tratamiento B con 14% de Cirian + 86% de concentrado (TB); Tratamiento C con 10% de Cocoite + 10% Caulote + 80% de concentrado (TC); Tratamiento D con 6% de Cirian + 5% de Cocoite + 5% Caulote + 7% de Cosmos + 77% de concentrado(TD).

7.6. Factor qm y el factor Ym

El Cuadro 10 muestra el factor qm y el factor Ym, determinados a partir de los resultados obtenidos durante el experimento. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos aplicados ($P > 0.05$).

Cuadro 9: Factor qm y el factor Ym. obtenidos del experimento en becerros alimentados con una dieta complementada con Cirian (*Crescentia alata*), Cocoite (*Gliricidia sepium*), Caulote (*Guazuma ulmifolia*) y Cosmos (*Cosmos bipinnatus*), administradas de forma individual y en combinación.

Tratamiento	Factor qm	Factor Ym
TB: Ci	0.49 ± 0.02	7.25 ± 0.66
TD: Co+Ca+Cos+Ci	0.41 ± 0.03	7.22 ± 0.45
TC: Co + Ca	0.49 ± 0.02	7.57 ± 0.88
TA: Control	0.43 ± 0.04	7.50 ± 1.03
Valor de P	**0.081**	**0.477**

Clave: Cirian (Ci), Cocoite (Co), Caulote (Ca), Cosmos (Cos)**.**

Tratamiento A 100% concentrado (TA); Tratamiento B con 14% de Cirian + 86% de concentrado (TB); Tratamiento C con 10% de Cocoite + 10% Caulote + 80% de concentrado (TC); Tratamiento D con 6% de Cirian + 5% de Cocoite + 5% Caulote + 7% de Cosmos + 77% de concentrado(TD).

7.7. Digestibilidad de la energía bruta

Cuadro 11 muestra los resultados obtenidos relacionados con la digestibilidad de la energía bruta expresada en porcentaje (GED, %), donde podemos apreciar que si existen diferencias significativas teniendo un valor de P= 0.04 (P < 0.05).

Cuadro 10: Digestibilidad de la energía bruta obtenida del experimento en becerros alimentados con una dieta complementada con Cirian (*Crescentia alata*), Cocoite (*Gliricidia sepium*), Caulote (*Guazuma ulmifolia*) y Cosmos (*Cosmos bipinnatus*), administradas de forma individual y en combinación.

Tratamiento	**GED, %**
TB: Ci	60.25 ± 1.70^{a}
TD: Co+Ca+Cos+Ci	53.00 ± 3.27^{b}
TC: Co + Ca	60.50 ± 1.73^{a}
TA: Control	55.25 ± 4.65^{ab}
Valor de P	**0.046**

Clave: Cirian (Ci), Cocoite (Co), Caulote (Ca), Cosmos (Cos)**.**

Tratamiento A 100% concentrado (TA); Tratamiento B con 14% de Cirian + 86**%** de concentrado (TB); Tratamiento C con 10% de Cocoite + 10% Caulote + 80% de concentrado (TC); Tratamiento D con 6% de Cirian + 5% de Cocoite + 5% Caulote + 7% de Cosmos + 77% de concentrado(TD).

VIII. DISCUSIÓN

El CH_4 es un subproducto de la digestión y la fermentación ruminal, siendo expulsado por el animal a través de exhalaciones y el eructo. En ambientes naturales, los rumiantes ingieren los forrajes disponibles para ser sometidos a procesos digestivos y a la acción fermentativa de bacterias, arqueas, hongos y protozoarios dentro del rumen. En este órgano, mediante un proceso de simbiosis, el alimento es transformado en ácidos grasos volátiles (AGV), amonio, hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2) Denman, (2015) Li *et al.,* (2009).
Los resultados del presente estudio indican que el tratamiento B (14 % de Ci + 86 % de concentrado), redujo la emisión de CH_4 entérico en un 14 %, debido a que se modificó la forma en que ocurre la fermentación ruminal, alterando el destino del hidrógeno producido por los microorganismos del rumen, sin embargo, es importante señalar que, a pesar de la tendencia observada, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos.

El resultado obtenido en el Tratamiento B concuerda con los reportados por (Villa-Mancera *et al.,* 2015), quienes apreciaron que al incluir el 15% del fruto de C. *alata* en dietas para corderos modifica la fermentación ruminal. En dicho estudio evaluaron la producción de gas *in vitro* y de metano (CH_4), así como el consumo de la ración y la tasa de crecimiento in vivo en 25 corderos machos. Las variables evaluadas como la fermentación y digestibilidad in vitro fueron analizadas atreves de un diseño completamente al azar con un arreglo factorial con el fin de poder analizar los cinco tratamientos aplicados durante los tres periodos de evaluación llegando a la conclusión que se altera la fermentación ruminal debido a la presencia de taninos, logrando una disminución en la metanogénesis sin alterar la digestibilidad de la dieta, por lo tanto, sugiere que el Cirian posee propiedades prácticas para la manipulación del ecosistema ruminal.

La reducción observada guarda coherencia con las investigaciones realizadas por el grupo de trabajo de (Ku-Vera *et al*., 2018). Ellos trabajan mediante cámaras de respiración de circuito abierto, las cuales permiten tener un control preciso del intercambio gaseoso; por lo tanto,

obtienen el total de metano exhalado por el animal. Al realizar ajustes puntuales en la dieta, es posible generar un impacto significativo dentro del balance energético ruminal. Su metodología resalta que al hacer uso de plantas locales no solo se debe a su disponibilidad, sino también que su inclusión como aditivo demostró una reducción del 14% en las emisiones. Por lo tanto, del potencial biológico de las especies nativas de la región representa una gran oportunidad para producir ganado con bajas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Las arqueas metanogénicas utilizan el H_2 con el fin de reducir el CO_2 y producir CH_4. Este proceso metabólico genera una pérdida de entre el 2% y el 12% de la energía bruta consumida por el animal Thacharodi *et al.,* (2024)). Por lo tanto, la metanogénesis reduce la eficiencia energética de los alimentos e incrementa las emisiones contaminantes de CH_4 (Patra & Yu, 2012; Sari *et al.,* 2024).

La manipulación dietética se realiza a través de la selección y uso de forrajes de la más alta calidad, la suplementación estratégica de forrajes y la incorporación de aditivos, modificar la proporción de concentrado enfocado en el cambio de la estructura de carbohidratos tomando en cuenta la mitigación de CH_4 emitido por el sector ganadero Ku-Vera *et al.,* (2018) y Min *et al.*,(2022).

Esto sugiere que la suplementación con aditivos naturales como el Cirian podría contribuir al establecimiento de una estrategia de mitigación de las emisiones de CH_4, lo cual beneficiaría tanto a pequeños como a grandes productores en regiones de clima tropical, ya que puede integrarse en unidades de producción con enfoque agroecológico orientadas a la producción de ganado con bajas emisiones de gases de efecto invernadero Hristov *et al.,* (2013) y Gerber *et al.*,(2013).

La experimentación mediante la inclusión de aditivos se busca reducir la emisión de CH_4 por cada kilogramo de materia seca (MS) consumida y de esta manera plantear estrategias eficaces de mitigación de GEI.

Por otro lado, el rendimiento de CH_4 (g CH_4/kg de MS) aumentó un 7.62 % con la aplicación del Tratamiento C (10 % de cocoite, 10 % de caulote y 80 % de concentrado). Este incremento sugiere que dicha formulación favoreció la actividad de los microorganismos

metanogénicos al incrementar la disponibilidad de hidrógeno (H_2) para las arqueas. Es probable que la dosis de aditivos empleada en este tratamiento fuera insuficiente para inhibir a las arqueas metanogénicas; por el contrario, la mezcla actuó como un sustrato fermentable que favoreció la emisión de CH_4. Por lo tanto, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos.

El incremento en el rendimiento de CH_4 sugiere que la combinación de los aditivos no logra alcanzar el umbral inhibitorio necesario. De acuerdo con Patra y Saxena (2010) y Cieslak *et al.*,(2023), los compuestos secundarios de las plantas integradas como aditivos presentan un efecto de dosis- dependientes. Cuando existen concentraciones bajas, provoca fallas en la supresión de las arqueas metanogenicas por lo que actúan como sustrato fermentable que estimula la producción de gas.

La respuesta observada en el Tratamiento C, en donde logramos ver que el rendimiento de CH_4, coincide con lo expuesto por Galindo *et al.* (2014) y Delgado *et al.,* (2022). En su estudio, los investigadores evaluaron como diferentes niveles de inclusión de cocoite tiene un efecto sobre la población de microorganismos metanogénicos. Utilizaron técnicas de fermentación *in vitro* con liquido ruminal de vacas canuladas, incubando las muestras a 39°C de forma estricta las condiciones anaerobias teniendo una simulación de todo el proceso que se lleva a cabo dentro del animal.

La acumulación de gas almacenados en los frascos de incubación se cuantifico a través de una cromatografía de gases, es uno de los métodos más precisos que permite determinar la pureza del CH_4. Así mismo, utilizaron técnicas de cultivo microbiológico para poder realizar un recuento directo y observar cuántas arqueas logran sobrevivir de acuerdo con la dosis de Cocoite. Calcularon la degradabilidad de la materia seca durante la fermentación con el fin de asegurar que el efecto no fuera a por falta de alimento para las bacterias.

Los resultados señalan que el cocoite posee un comportamiento dual: en niveles bajos de inclusión, aporta nitrógeno de alta calidad y carbohidratos fermentables encargados de alimentar el ecosistema ruminal; esto provoca que las bacterias trabajen a una mayor velocidad y por ende existe una mayor disponibilidad de hidrogeno para la metanogénesis.

Para lograr obtener un efecto inhibidor es necesario incorporar una dosis lo suficientemente alta en un rango del 15-20%, dentro de este rango los metabolitos secundarios, como taninos y saponinas, alcanzan la concentración suficiente para reducir la población de arqueas y mitigar la producción de CH_4.

En cuanto a la intensidad de la emisión (relación entre el CH_4 emitido en relación con la producción o la ganancia de peso del animal), se observaron diferencias estadísticas significativas. El Tratamiento D (6% de Cirian + 5% de Cocoite + 5% Caulote + 7% de Cosmos + 77% de concentrado) logro una gran reducción de la intensidad de la emisión en comparación con el tratamiento control que no incluye ningún aditivo. Estos resultados indican un uso más eficiente de la energía metabolizable por parte del animal. Al optimizar la eficiencia metabolica, el animal logra alcanzar una mayor ganancia de peso mientras se reducen los niveles de emisión de CH_4. Por lo tanto, la inclusión y combinación de estos aditivos representa una gran oportunidad estratégica para maximizar la productividad cárnica mitigando simultáneamente el impacto ambiental del sector ganadero.

Este descubrimiento propone un fenómeno de sinergia biológica entre los metabolitos secundarios del cirian, cocoite, caulote, y cosmos. Según Cobellis *et al.*,(2016), la mezcla de estos aditivos aumenta la inhibición de la metanogenesis al intervenir simultáneamente sobre las diferentes rutas metabólicas de las arqueas.

De acuerdo con Cottle *et al.*, (2011), al disminuir la metanogénesis mediante el uso de aditivos, se reduce la intensidad de emisión. Esto permite que la energía que normalmente se perdía a través del eructo (en un rango del 2 % al 12 %) sea aprovechada por el animal. Con base en esta premisa, la suplementación con cirián favorece que una mayor proporción de la energía consumida se redirija hacia procesos metabólicos de crecimiento, tales como la ganancia de peso vivo.

Según Karnati *et al.* (2009), la presencia de polifenoles y flavonoides contenidos enr los aditivos vegetales impulsan a una mejora significativa en la eficiencia en relación con el uso del nitrógeno y de la energía. La disminución de la metanogénesis, favorece tanto la síntesis de proteína microbiana como a la producción de propinato, estos mecanismos fundamentan que exista una mayor eficiencia alimenticia observada en el animal.

En cuestión del consumo de materia seca (CMS) disminuyó un 6% con la aplicación del Tratamiento D (6% de Cirian + 5% de Cocoite + 5% Caulote + 7% de Cosmos + 77% de concentrado). Comúnmente asociamos que al existir una disminución en el CMS tiene efectos negativos sin embargo al incluir aditivos en la dieta, este resultado obtenido es una señal clara de que estamos haciendo la digestión más eficiente. En consecuencia, el animal logra obtener más energía por cada bocado.

Cuando el rumen se vuelve más eficiente, el animal logra cubrir sus requerimientos energéticos con mayor rapidez, lo que resulta en una reducción del consumo. Si la ingesta disminuye, pero la ganancia de peso se mantiene o supera a la del grupo control (sin aditivos), significa que los componentes incorporados funcionan óptimamente, mejorando así la conversión alimenticia a pesar de esto no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos.

Una buena aceptación de los tratamientos experimentales aplicados se fundamenta con los principios de consumo propuestos por Forbes (2007) y Daniel *et al.*, (2022). El autor plantea que el consumo voluntario es un resultado obtenido través de una integración de señales físicas y metabólicas. En este estudio la inclusión de los aditivos no género rechazo por palatabilidad ni provoco un llenado ruminal excesivo que limitara la ingesta. Por lo tanto, se sugiere que el tratamiento mantuvo un equilibrio energético adecuado, permitiendo la reducción de CH_4 sin poner en riesgo el aporte de nutrientes necesarios para el mantenimiento y la producción de carne o leche.

Aunque el CMS se mantenga estable o exista una pequeña variación entre los tratamientos, esto no debe interpretarse como factor limitante. El propósito de la ganadería agroecológica es producir más sin afectar el consumo logrando simultáneamente disminuir la emisión de CH_4. De acuerdo con Calsamiglia *et al.*, (2007) y Molina-Botero *et al.*, (2022), diversos extractos vegetales actúan como modificadores de la fermentación microbiana, optimizan la relación que existe entre energía y proteína. Este proceso permite que a través de la inhibición de las bacterias proteolíticas y arqueas metanogénicas, el animal logra mejorar su eficiencia alimenticia. Al reducir el gasto energético derivado de la emisión de CH_4, la energía redirigida es aprovechada por el animal para su mantenimiento o aumento de su ganancia de

peso. Calsamiglia y su equipo analizaron exhaustivamente experimentos tanto in vitro como in vivo, centrándose en la actividad antimicrobiana de estos compuestos.

En cuanto a la digestibilidad de la materia seca (DMS), se apreció una disminución del 6% con la aplicación del Tratamiento D (6% de Cirian + 5% de Cocoite + 5% Caulote + 7% de Cosmos + 77% de concentrado). Esta reducción puede atribuirse a una menor degradación de la fibra; no obstante, los aditivos promueven una fermentación más eficiente al aumentar la proporción de ácido propionico en el rumen, lo que eleva drásticamente la eficiencia energética. A sí mismo la inclusión de los componentes mejoran drásticamente la absorción de nutrientes a nivel intestinal, permitiendo que los nutrientes circulantes en el torrente sanguíneo se conviertan en peso corporal de una manera más eficaz.

En síntesis, al aplicar el tratamiento D, el animal desarrollo un sistema más eficiente minimizando el gasto metabólico de mantenimiento y, por lo tanto, redirecciona una mayor cantidad de energía hacia el crecimiento.

A pesar de la disminución del 6% en la DMS en el Tratamiento D, se pudo apreciar una mejora en el desempeño productivo. Esta supuesta contradicción se puede explicar debido a una buena optimización en la partición de la energía. Según Speijers *et al.,* (2004) y Alemu *et al.,* (2022), la presencia de taninos y metabolitos secundarios llega a reducir la degradación de la fibra, pero beneficia el flujo de nutrientes directo al intestino delgado, optimizando su absorción. Al mismo tiempo, como sugiere Ungersbak (2021), el desplazamiento de la fermentación enfocada a la producción de propinato aumenta la eficiencia energética neta.

La producción de heces presentó un ligero incremento del 3% al aplicar el Tratamiento D (6% de cirián, 5% de cocoite, 5% de caulote, 7% de cosmos y 77% de concentrado). Este fenómeno se atribuye a que algunos de los aditivos utilizados poseen un alto contenido de taninos condensados, como es el caso del caulote (*Guazuma ulmifolia*). Según análisis realizados en el Laboratorio de Nutrición Animal de la Universidad Autónoma de Yucatán, esta especie presenta un contenido de taninos condensados del 17.95%. Estos compuestos tienen la capacidad de formar complejos con las proteínas y la fibra, los cuales resultan resistentes a la degradación por parte de las bacterias ruminales. Debido a la concentración de aditivos en este tratamiento, una fracción de la materia orgánica que previamente se fermentaba ahora fluye a través del tracto digestivo y es excretada, lo que genera un mayor

volumen de materia seca en las heces, lo que resulto en diferencias estadísticamente significativas ($P< 0.05$).

Los efectos de los tratamientos evaluados repercuten en la fermentación ruminal, generando un impacto en la cinética digestiva posterior. Según Min *et al.* (2003) y Min *et al.* (2022), los taninos condensados que contiene el fruto como el Cirian cuentan la capacidad de conformar complejos estables con las proteínas dietéticas, resguardándolas de la degradación microbiana realizada en el rumen. Lo cual contribuye a la reducción CH_4 limitando la disponibilidad de sustratos para las arqueas, de igual manera eleva el flujo de nitrógeno dirigido hacia el tracto posterior. El sutil incremento en la producción de heces observado en los resultados obtenidos coincide con lo reportado por estos autores, de igual manera señalan que una parte de estos complejos pueden ser excretados, mejorando la salud intestinal y reduciendo la carga parasitaria, lo que representa otro de los beneficios adicionales de la suplementación de C. *alata*.

De acuerdo con Rosales-Nieto *et al.* (2023), al haber presencia de compuestos fenólicos y taninos en los aditivos como el caulote *(Guazuma ulmifolia)* genera un efecto de protección sobre la fibra dietética, lo que reduce la tasa de fermentación *in vivo*. Este fenómeno ha sido argumentado ampliamente por la Red de Sistemas Silvopastoriles de la UADY, donde se han evaluado plantas arbóreas del trópico (como el cauolote y cocoite), en ovinos de la rasa Pelibuey. En dichos estudios, se utilizaron dietas compuestas por forrajes tropicales de baja calidad suplementadas con un bajo niveles estratégicos de follaje o frutos con un alto contenido de taninos y precursores de propinato. Los animales pasaron por un periodo de adaptación de 15 a 21 días para permitir que la microbiota ruminal se acoplara a los compuestos fenólicos de las plantas.

Para medir la degradabilidad y la producción de heces, aplicaron técnicas precisas, como la de bolsa de nailon, la cual consiste en introducir muestras directamente en el rumen vía cánula para después retirarlas en intervalos específicos (2,6,12,24 y 48 h) y para calcular la tasa de desaparición de la metería orgánica. Asimismo, los animales fueron alojados en jaulas metabólicas equipadas con arneses para separar y cuantificar diariamente el total de heces producidas. El análisis fenoles y taninos se realizó mediante método de Folin-Ciocalteu para cuantificar los compuestos que ligan a la fibra y reduce su digestibilidad. Se concluyó que la

alta concentración de compuestos fenólicos y lignina, disminuye la degradación; al ser este proceso más lento, una mayor parte del material vegetal atraviesa todo el tracto digestivo sin ser degradado por las bacterias. Esto se traduce en un incremento la producción de materia seca fecal, lo que explica el aumento del 3% observado en el tratamiento D.

La ganancia de peso de los animales fue significativamente superior con el Tratamiento D (6% de cirián, 5% de cocoite, 5% de caulote, 7% de cosmos y 77% de concentrado), alcanzando 1.37 kg/día en comparación con el 0.46 kg/día del grupo no cuenta con ningún aditivo. Estos resultados demuestran que el animal realizo un uso más eficiente de la energía, a pesar del ligero incremento en la perdida de energía a través de las heces, la ganancia de peso es mayor debido a que los aditivos logran mitigar las perdidas energéticas en forma de metano (CH_4) y orina. En consecuencia, se confirmaron diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.05$).

En el balance final de la partición de la energía, al ahorrar energía gaseosa se traduce en un mejor flujo de aminoácidos hacia el intestino. Este beneficio metabólico superando considerablemente la energía perdida por vía fecal; por lo tanto, aunque la excreción sea mayor, el proceso es metabólicamente más eficiente.

Los resultados obtenidos tienen sustento técnico en los principios de balance energético descritos por Beauchemin *et al.,* (2009), quienes establecieron que la emisión de CH_4 constituye una pérdida significativa que puede llegar hasta el 12% de la energía bruta ingerida por el animal. Al mitigar la metanogénesis mediante la inclusión de los cuatro aditivos, se consiguió disminuir dicha pérdida energética, aumentando así la disponibilidad de Energía Neta de Producción (EN_p). Esta energía rescatada, posiblemente mediada por un incremento en la síntesis de propinato ruminal, permitió que los animales canalizaran mayores recursos metabólicos hacia la conformación de tejido muscular.

La respuesta productiva observada en los animales suplementados se fundamenta con el efecto sinérgico de los metabolitos secundarios que componen a los aditivos incluidos en el tratamiento descritos por Hess *et al.,* (2005) y Ku-Vera *et al.,* (2022). En nuestro estudio, la mezcla de compuestos fenólicos como el Caulote con contenido de 10.48% y Cosmos con 2.46% de fenoles totales junto con las saponinas identificadas en los análisis del Laboratorio de Nutrición Animal de la Universidad Autónoma de Yucatán logrando optimizar el balance

de nitrógeno. Según Hess, aunque puede existir una ligera disminución de la digestibilidad de la materia orgánica provocando el aumento del 3% en la producción de heces se generó un gran impacto positivo mejorando la eficiencia del uso del nitrógeno. Al inhibir la desaminación ruminal y reducir la excreción de urea urinaria, se consigue una mayor retención de nitrógeno corporal, justificando la notable ganancia de peso registrada.

En cuanto al consumo de energía bruta expresada en MJ/d (GE, MJ/d), se observó un ligero incremento con la aplicación del Tratamiento D (6% de cirián, 5% de cocoite, 5% de caulote, 7% de cosmos y 77% de concentrado). Este aumento se atribuye a que los aditivos vegetales están compuestos por metabolitos secundarios, los cuales presentan una alta densidad energética. En consecuencia, el contenido de energía bruta ingerido por el animal aumentó; no obstante, es importante señalar que un mayor consumo de EB no implica necesariamente un aprovechamiento total de la misma por parte del organismo por lo tanto no se encontraron diferencias estadísticamente significativas.

De acuerdo con NASEM (2021) postulan que la EB es exclusivamente el potencial de combustión total del alimento consumido por el animal y no su valor nutritivo real.

Para comprender todo lo relacionado con el balance energético en dietas complementadas con plantas nativas de regiones tropicales es necesario realizar un análisis que comienza por la EB contenida en alimento consumido por el animal. De acuerdo con (Piñeiro-Vázquez *et al.* 2017) evaluaron niveles crecientes de taninos condensados (TC) en novillos cruzados (*Bos indicus x Bos taurus*) bajo condiciones tropicales, utilizando dietas con diferentes inclusiones de forraje rico en taninos para medir cambios en la digestibilidad y emisiones de gas. En dicho estudio se empleó *Leucaena leucocephala*, una especie arbórea tropical con características similares al cirián y al caulote. La presencia de compuestos fenólicos y aceites en estas plantas provoca un aumento en la lectura de EB en el laboratorio; no obstante, debido a su efecto inhibitorio en la digestibilidad ruminal, esta energía no es aprovechada por completo. El incremento del 3% en la producción de heces registrado en el presente experimento concuerda con los hallazgos de Piñeiro-Vázquez *et al.* (2017), quienes señalan que los taninos aumentan las pérdidas de energía fecal. Sin embargo, este fenómeno se compensa con la reducción en las emisiones de metano (CH_4), lo que altera el flujo energético

y permite al animal alcanzar una mayor eficiencia metabólica a pesar de la pérdida aparente en las excretas.

El consumo de energía digestible por día (ED, MJ/d) fue ligeramente inferior al aplicar el Tratamiento D (6% de Cirián, 5% de Cocoite, 5% de Caulote, 7% de Cosmos y 77% de concentrado) en comparación con el Tratamiento A (100% concentrado). Dicho descenso se atribuye a la sustitución de carbohidratos no estructurales de rápida fermentación por fracciones fibrosas contenidas en la mezcla de arbóreas; esta modificación en la dieta provoca cambios en la cinética de degradación debido a la interacción entre los metabolitos secundarios de las plantas y los procesos fisiológicos del sistema digestivo.

La disminución en la digestibilidad de la materia seca que se observó al aplicar el TD coincide con la revisión de Patra y Saxena (2011) y Palangi *et al.,* (2024), quienes fundamentan que los fitoquímicos, como los taninos, alteran el funcionamiento ruminal. De acuerdo con estos autores, la menor degradación de la fibra se debe a la inhibición específica de las bacterias celulolíticas y a la formación de complejos con los carbohidratos estructurales, lo que restringe la actividad enzimática microbiana. Este fenómeno, evaluado mediante técnicas de producción de gas *in vitro,* permite comprender por qué el animal muestra un menor consumo de energía digestible sin que esto comprometa su rendimiento productivo.

La respuesta digestiva obtenida ante la inclusión de aditivos de la región tropical se cimienta en la compleja interacción entre los metabolitos secundarios y los procesos fisiológicos del animal. De acuerdo con Makkar (2003) y Rosales-Nieto *et al.,* (2023), los taninos condensados presentes en los aditivos utilizados en el Tratamiento D (TD) poseen una alta capacidad para ligarse a las proteínas y carbohidratos de la dieta. Esto permite la formación de complejos estables que resisten el proceso de degradación microbiana en el rumen, reduciendo así la digestibilidad de estos componentes a nivel ruminal.

En cuestión del consumo de energía metabolizable (ME, MJ/d) existió una mínima reducción al aplicar el Tratamiento D (6% de Cirián, 5% de Cocoite, 5% de Caulote, 7% de Cosmos y 77% de concentrado) en comparación con el Tratamiento A (100% concentrado). El descenso se genera a causa del uso de los aditivos implementados en el experimento a debido a una menor digestibilidad de la materia seca y al precio de procesar los componentes fenólicos que constituyen a los aditivos sin embargo esta pérdida es compensada con una mayor

eficiencia en el uso de la energía neta (EN). Al disminuir la perdida por emisión de CH_4 y estabilizarse la fermentación ruminal, el animal destina una mayor parte de la energía restante hacia la ganancia de peso, mejorando el rendimiento productivo del sector ganadero.

El experimento realizado por Beauchemin *et al.,* (2007) y ratificando en el meta-análisis de Palangi *et al.,* (2024) señala que la inclusión de taninos reduce la producción de CH_4 en un 13%. En su estudio, realizado mediante cámaras de respiración de circuito abierto, midieron el consumo exacto de alimento y recolectaron el 100% de las heces y la orina durante cinco días por cada periodo, con la finalidad de calcular la energía digestible y la energía metabolizable. Para ello, utilizaron ocho novillos de la raza Angus con un peso inicial promedio de 560 kg y un diseño experimental de cuadrado latino 4x4. En la prueba, compararon una dieta base (control) contra dietas complementadas con extracto de taninos condensados de quebracho (*Schinopsis lorentzii*) en diferentes niveles (hasta un 2% de la materia seca). Los autores pudieron demostrar que la adición de taninos restringe significativamente la emisión de metano por kilogramo de materia seca consumida. Al reducir esta pérdida, el balance energético se inclina de manera positiva hacia la ganancia de peso; esto ocurre a pesar de la disminución observada en la digestibilidad aparente, debido a que el animal logra una mayor eficiencia en el aprovechamiento de la energía metabolizable.

De acuerdo con los principios establecidos por Blaxter (1962) en su obra principal The Energy Metabolism of Ruminants donde plasma que la eficiencia con al que el animal ase uso de la ME no es invariable, ya que depende directamente de la concentración energética de la ración consumida. Al sustituir parte de la dieta comercial para complementarla con fracciones fibrosas de arbóreas, se genera un impacto directo en la metabolicidad de la dieta, disminuyendo el factor qm; esto incrementa la pérdida de energía en forma de calor fermentativo y procesos de digestión.

El resultado observado al aplicar el Tratamiento D en relación con la eficiencia energética puede analizarse a través del factor de metabolicidad (qm) el cual se define como la relación que existe entra la EM y la EB (AFERC, 1993). En este estudio, se pudo apreciar una disminución en la digestibilidad de la materia seca generando una reducción en el valor de qm; no obstante, la ganancia de peso obtenida con este tratamiento demuestra uan mayor eficiencia del animal en la utilización de la EM. Según (Blaxter y Boyne (1978), los

rendimientos productivos presentado por el animal se encuentran estrechamente relacionados con la calidad de la fermentación conciderando la estabilización del ambiente ruminal promovida por los aditivos incluidos dentro de la dieta permitió que, a pesar de existir una disminución en el consumo de EM la energía neta (EN_g) destinada para el desarrollo muscular fuera superior.

Al determinar el factor qm del experimento, se obtienen resultados superiores al aplicar el Tratamiento C (10% de Cocoite + 10% Caulote + 80% de concentrado) el cual alcanzo un valor de 0.49 en comparación con el 0.43 del grupo control. Esta mejora se debe a la combinación de los aditivos incluidos en la dieta, los cuales optimizan la conversión de EB a EM. El aumento que se observó se atribuye a la disminución en las perdidas energéticas a causa de la metanogénesis y a una mejor simultaneidad entre la degradación de carbohidratos y proteínas, lo que resulta en una dieta con mayor valor para el animal.

Este incremento coincide con lo presentado por Johnson y Johnson (1995), quienes establecen que la mitigación de la metanogénesis restringe las pérdidas energéticas (las cuales pueden representar hasta el 12% de la EB), permitiéndole que una mayor parte de la EB logre convertirse en EM. De este modo se logró obtener un aumento en el factor qm se atribuye a una relación optima entre la degradación de carbohidratos fermentables y la disponibilidad de nitrógeno aportado por los aditivos, actuando como un mecanismo de ahorro energético. Como sustenta Janssen (2010), al haber un descenso en la metanogénesis beneficia a las rutas fermentativas más eficaces como la propionogénesis, esto revela por qué los animales del Tratamiento D alcanzaron una mayor ganancia de peso a pesar de una menor digestibilidad aparente de la materia seca.

Por otro lado, el factor Ym es fundamental para poder evaluar la eficiencia energética de los tratamientos aplicados ya que representa la proporción de la EB que el animal pierde en forma de CH_4. Según el IPCC (2019), el valor promedio para bovinos es del 6.5%; no obstante, la inclusión de aditivos en la dieta puede reducir significativamente este indicador. Como lo remarcan Hristov *et al.* (2013), los taninos y otros metabolitos secundarios presentes en las plantas tropicales actúan como mitigadores de la metanogénesis reduciendo simultáneamente al factor Ym. Esta disminución en la perdida de energía de manera gaseosa expone la mejora

en el balance energético y la optimización del uso de la energía neta para la ganancia de peso que se logró observar en el experimento.

IX. CONCLUSIONES

Las inclusiones de aditivos vegetales ricos en metabolitos secundarios alteran eficientemente la partición de la EB en los becerros. Aunque se apreciaron ligeras disminuciones en la digestibilidad de la materia seca y un incremento marginal en la pérdida en forma de heces (3%), este impacto fue considerablemente compensado a través de la mitigación de las pérdidas en forma de metano y orina. Todo este proceso permitió el flujo de nutrientes hacia el tracto posterior, lo que aumentó la disponibilidad de energía neta de producción (ENp) e influyó positivamente en el desempeño productivo, logrando ganancias de peso de hasta 1.37 kg/día en comparación con los 0.46 kg/día del grupo control.

La inclusión del Cirian (*Cresentia alata*) logro disminuir la emisión de CH_4 en un 14% al conseguir modificar el destino del hidrogeno producido por los microrganismo del rumen. Esto reafirma que los taninos contenidos en el aditivo intervienen como reguladores de la metanogénesis, al reducir el factor de perdida energética gaseosa (Ym), lo que consolidanda al cirian como un aditivo fundamental para establecer estrategias agroecológicas enfocadas en mitigar las emisiones de CH_4 en el sector ganadero.

El efecto del Caulote (*Guaszuma ulmifolia*) y Cocoite (*Gliricidia sepium*), como aditivos en un nivel de inclusión del 10% para ambos en el tratamiento, no consigue suprimir a las arqueas metanogénicas dentro de la partición de la energía. Por otra parte, a causa de sus concentraciones, esta mezcla aporto nitrógeno de alta calidad y carbohidratos altamente fermentables que promovieron la cinética microbiana ruminal, lo que genero un aumento del 7.62% en el rendimiento CH_4. Asimismo, esta misma combinación optimizo la transición de EB a EM, lo que incremento la eficiencia del animal y, al mismo tiempo elevando el factor de metabolicidad (qm) a un valor máximo de 0.49, superando así al de la dieta base control.

El efecto del Cosmos (*Cosmos bipinnatus*) y la asociación biológica de los cuatro aditivos incluidos en el Tratamiento D (6% de Cirian + 5% de Cocoite + 5% Caulote + 7% de Cosmos) sobresaltaron interacción entre los compuestos fenólicos del caulote (10.48%) y el cosmos (2.46%) de fenoles totales. Esto en conjunto con las saponinas y los taninos condensados del Ciria y el Cocoite, influyeron simultáneamente en las diversas rutas metabólicas de las arqueas. Esta mezcla restringió de manera significativa la intensidad de la emisión de metano y perfeccionó el equilibrio del nitrógeno e inhibió de la desaminacion ruminal. Como resultado la redirección la energía que normalmente se pierde en el eructo hacia la propionogénesis, intestinal, dando la oportunidad a los animales mejoraran significativamente su conversión alimenticia y maximizaran la ganancia de peso diaria de peso, a pesar de la ligera disminución del 6% en el consumo voluntario y en la digestibilidad.

X. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Agricultural and Food Research Council. (1993). *Energy and protein requirements of ruminants: An advisory manual prepared by the AFRC Technical Committee on Responses to Nutrients*. CAB International.

Aldrovandi, A. (2020). *Adaptación de sistemas de fermentación ruminal in vitro para evaluar el efecto modulador de cuatro potenciales prebióticos* (Tesis de maestría). Repositorio Colibrí, Universidad de la República.

Alemu, A. W., Shreck, A. L., & Beauchemin, K. A. (2022). Energy partitioning, metabolic efficiency, and enteric methane emissions in growing beef cattle fed diets supplemented with plant bioactive compounds. *Journal of Animal Science*, *100*(4), Artículo skac084.

Allen, M. S., & Mertens, D. R. (1988). Evaluation of limitations in fiber digestion by rumen microbes. Journal of Nutrition, 118(2), 261–270.

Ángeles-Hernández, J. C., Ku-Vera, J. C., Vázquez-Carrillo, M. F., Castelán-Jaime, S. V., Molina, L. T., Benaouda, M., Kebreab, E., González-Ronquillo, M., Paz-Pellat, F., Montelongo-Pérez, H. D., & Castelán-Ortega, O. A. (2024). Análisis de las emisiones de metano entérico de bovinos en las regiones geoclimáticas de México y evaluación de la incertidumbre.

Bailey, C. B. (1961). Salivary secretion and its relation to feeding in cattle. British Journal of Nutrition, 15(1), 113–123.

Beauchemin, K. A., McAllister, T. A., y McGinn, S. M. (2009). Dietary mitigation of enteric methane from cattle. *Proceedings of the 3rd International Conference on Greenhouse Gases and Animal Agriculture*, *123*(1-3), 20-27.

Beauchemin, K. A., McGinn, S. M., Martinez, T. F., y McAllister, T. A. (2007). Use of condensed tannins to reduce methane production by beef cattle. *Journal of Animal Science*, *85*(8), 1990–1996.

Berry, D. P., Friggens, N. C., McDonnell, M., & de Haas, Y. (2022). Genetics and phenomics of efficiency, breeding, and growth performance in beef and dairy cattle: A review. *Journal of Dairy Science*, 105(6), 4711-4735.

Blaxter, K. L. (1962). *The energy metabolism of ruminants*. Hutchinson.

Blaxter, K. L., & Boyne, A. W. (1978). The estimation of the nutritive value of feeds as energy sources for ruminants and the derivation of feeding systems. *Journal of Agricultural Science, 90*(1), 47-68.

Calsamiglia, S., Busquet, M., Cardozo, P. W., Castillejos, L., y Ferret, A. (2007). Essential oils as modifiers of rumen microbial fermentation. *Journal of Dairy Science, 90*(6), 2580-2595.

Cardoso, F. F., Madsen, P., Har, A. H., & Jensen, J. (2018). Genetic background in partitioning of metabolizable energy efficiency in dairy cows. Journal of Dairy Science, 101(4), 3109–3121.

Castelán-Ortega, O. A., García-López, J., Hernández-Cruz, L., & Martínez-García, M. (2020). Partición de la energía bruta consumida y el aporte de energía metabolizable en bovinos F1. Revista de Producción Animal, 25(1), 12–20.

Castelán-Ortega, O. A., González-Razo, F. J., & Estrada-Flores, J. G. (2023). *Estructura anatómica y degradabilidad ruminal de la fibra en forrajes templados y tropicales*. Universidad Autónoma del Estado de México.

Cieslak, A., Bryszak, M., Szumacher-Strabel, M., & Patra, A. K. (2023). Interactions of plant secondary metabolites and their mixtures on rumen fermentation and methanogenesis: A review of mechanisms and thresholds. *Animal Feed Science and Technology, 296,* Artículo 115541.

Cobellis, G., Trabalza-Marinucci, M., y Yu, Z. (2016). Critical review of the effects of plant-derived ethnoveterinary compounds on rumen microorganisms. *Animal Feed Science and Technology*, *214*, 1-25.

Cottle, D. J., Nolan, J. V., & Wiedemann, S. G. (2011). Ruminant methane mitigation strategies: a review. *Animal Production Science*, *51*(6), 491-514.

Daniel, J. B., van Gastelen, S., & Dijkstra, J. (2022). Nutritional and physiological factors regulating voluntary feed intake in ruminants: A review of mechanisms and models. *Animal Feed Science and Technology, 285,* Artículo 115214.

Delgado, J. A., Ortiz, A., & Galindo, J. (2022). Evaluation of tropical plant extracts as rumen modifiers: Effects on methanogenesis and fermentation parameters. *Journal of Applied Animal Research*, *50*(1), 345–353.

Denman, S. E., Martinez-Fernandez, G., Abecia, L., Martin-Garcia, A. I., Ramos-Morales, E., Newbold, C. J., & Yáñez-Ruiz, D. R. (2015). Metagenomic analysis of the rumen

microbial community following inhibition of methane formation by a halogenated methane analog. Frontiers in Microbiology, 6, 1087.

Duarte, M. S., Gionbelli, M. P., & Rennó, L. N. (2022). *Sistemas de alimentación y requerimientos nutricionales del ganado bovino de carne* (3.ª ed.). Universidad Federal de Viçosa.

Forbes, J. M. (2007). *Voluntary food intake and diet selection in farm animals* (2.ª ed.). CABI Publishing.

Galindo, J., González, N., Sosa, A., Ruiz, T., Febles, G., Marrelo, Y., Aldana, A. I., Torres, V., Sarduy, L., & Díaz, A. (2014). Efecto de *Gliricidia sepium* sobre la población de arqueas metanogénicas y la producción de metano ruminal. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, *48*(4), 359-364.

Galyean, M. L., Cole, N. A., Tedeschi, L. O., & Branine, M. E. (2016). Efficiency of converting digestible energy to metabolizable energy and reevaluation of maintenance requirements of the California Net Energy System and equations for predicting diet net energy values for beef cattle. Journal of Animal Science, 94(4), 1329–1341.

Guglielmotti, M., Gaggiotti, M., & Maciel, M. (2023). *Fisiología digestiva y metabolismo de los rumiantes* (Material didáctico de cátedra). Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral.

Hess, H. D., Monsalve, L. M., Lascano, C. E., Carulla, J. E., Díaz, T. E., y Kreuzer, M. (2005). Effects of saponins and tannins on methanogenesis and nitrogen utilization by Ruminal microbes in vitro and in sheep. *Journal of Animal Science*, *83*(12), 2740-2749.

Hristov, A. N., et al. (2013). *Mitigation of methane emissions from livestock: A strategy options analysis*. FAO Animal Production and Health Paper No. 177. FAO, Roma.

Hristov, A. N., Oh, J., Lee, C., Meinen, R., Montes, F., Ott, T., Firkins, J., Rotz, A., Dell, C., Adegbidi, A., & Giglio, K. (2013). *Mitigation of greenhouse gas emissions in livestock production: A review of technical options for non-CO2 emissions* (P. J. Gerber, B. Henderson, & H. P. S. Makkar, Eds.). FAO Animal Production and Health Paper No. 177. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2020). *Catálogo de Localidades, Municipio de Toluca, Estado de México*. Archivo Histórico de Localidades.

IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Eggleston S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (eds).

Janssen, P. H. (2010). Influence of hydrogen on rumen methane formation. *Applied and Environmental Microbiology*, *76*(21), 7026-7042.

Johnson, K. A., & Johnson, D. E. (1995). Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*, *73*(8), 2483–2492.

Johnson, K. A., & Johnson, D. E. (1995). Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*, 73(8), 2483-2492.

Johnson, K. A., y Johnson, D. E. (1995). Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*, *73*(8), 2483-2492.

Karnati, S. K. R., Sylvester, J. T., Noftsger, S. M., Yu, Z., St-Pierre, N. R., y Firkins, J. L. (2009). Effect of plant extracts on ruminal methanogenesis and fermentation in continuous culture. Animal Feed Science and Technology, 151(1-2), 28-40.

Kay, R. N. B. (1960). The rate of flow of digesta and the absorption of nutrients in the ruminant stomach. British Journal of Nutrition, 14(2), 325–345.

Kongphitee, K., Sommart, K., Phonbumrung, T., Gunha, T., & Suzuki, T. (2018). Feed intake, digestibility and energy partitioning in beef cattle fed diets with cassava pulp instead of rice straw. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 31(9), 1431–1441.

Ku-Vera, J. C., Jiménez-Ferrer, G., Alayón-Gamboa, J. A., Montoya-Flores, M. D., Piñeiro-Vázquez, A. T., Aguilar-Pérez, C. F., Solorio-Sánchez, F. J., Ramírez-Avilés, L., & Ruiz-Sesma, B. (2018). Dietary manipulation: a sustainable way to mitigate methane emissions from ruminants. *Acta Veterinaria Scandinavica*, *60*(1), 15.

Ku-Vera, J. C., Jimenez-Ocampo, R., Valencia-Salazar, S. S., Montoya-Flores, M. D., Molina-Botero, I. C., Arango, J., Solorio-Sánchez, F. J., & Aguilar-Pérez, C. F. (2022). Role of secondary metabolites from tropical plants in modifying ruminal fermentation and reducing enteric methane emissions in ruminants. *Frontiers in Animal Science*, *3*, Artículo 856555.

Lee, S., Kim, Y., Oh, Y., & Kwak, W. (2010). Effects of total mixed ration feeding methods on behavior patterns of growing Hanwoo steers. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 23(11), 1469–1475.

Maina, M. W., Paul, B. K., Burkart, S., & Janssens, F. (2022). Economic assessment of feeding strategies and input costs in smallholder ruminant production systems. *Animal Feed Science and Technology*, 285, 115214.

Makkar, H. P. S. (2003). Effects and fate of tannins in ruminant animals, adapted to feed containing tannins. *Fitoterapia*, *74*(7-8), 651-660.

McDonald, P., Edwards, R. A., Greenhalgh, J. F. D., Morgan, C. A., Sinclair, L. A., & Wilkinson, R. G. (2011). *Animal nutrition* (7.ª ed.). Pearson,23 (1), 282–298.

Mendoza-Martínez, G. D., Plata-Pérez, F. X., Espinosa-Cervantes, R., & Lara-Bueno, A. (2008). Manejo nutricional para mejorar la eficiencia de utilización de la energía en bovinos. Universidad y Ciencia, 24(1), 75–87.

Mertens, D. R. (2021). Impact of forage quality and fiber kinematics on chewing activity and ruminating behavior in cattle. *Animal Feed Science and Technology*, 272, 114772.

Min, B. R., Barry, T. N., Attwood, G. T., y McNabb, W. C. (2003). The effect of condensed tannins on the nutrition and health of ruminants fed fresh forage: a review. *Animal Feed Science and Technology*, *106*(1-4), 3-19.

Min, B. R., Solaiman, S., Waldrip, H., Parker, D., Todd, R., & Brauer, D. (2022). Dietary mitigation strategies for enteric methane emissions in ruminants: A review of selected forage plants containing secondary metabolites and carbohydrate structures. *Animals*, *12*(19), Artículo 2631.

Molina Santiago, P. C. (2021). *Estudio anatomo-patológico en compartimientos gástricos de bovinos faenados en rastro* (Tesis de licenciatura). Repositorio Institucional de la UAM.

Molina-Botero, I. C., Chirinda, N., Barahona, R., Arango, J., & Ku-Vera, J. C. (2022). Tropical forage plants and secondary metabolites: A sustainable strategy to manipulate rumen fermentation, improve nutrient utilization, and mitigate enteric methane emissions in agroecological livestock systems. *Frontiers in Animal Science*, *3*, Artículo 915470.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). *Nutrient requirements of dairy cattle* (8.ª ed.). National Academies Press.

Neubauer, V., Petri, R. M., Humer, E., Kröger, I., Reisinger, N., Baumgartner, W., Wagner, M., & Zebeli, Q. (2020). High-starch diet induces ruminal acidosis and hindgut dysbiosis in dairy cows at different lactations. Animals, 10(10), 1727.

Nkrumah, J. D., Okine, E. K., Mathison, G. W., Schmid, K., Li, C., Basarab, J. A., Price, M. A., Wang, Z., & Moore, S. S. (2006). Relationships of feedlot feed efficiency, performance, and feeding behavior with metabolic rate, methane production, and energy partitioning in beef cattle. Journal of Animal Science, 84(1), 145–153.

Palangi, V., Lackner, M., & Jayanegara, A. (2024). Modulating rumen fermentation kinetics and enteric methane emissions using plant bioactive compounds: A meta-analysis of digestibility and performance trade-offs. *Animal Feed Science and Technology*, *308*, Artículo 115852.

Patra, A. K., & Yu, Z. (2012). Effects of essential oils on methane production and fermentation by, and abundance and diversity of, rumen microbial populations. *Applied and Environmental Microbiology*, *78*(12), 4271–4280.

Patra, A. K., y Saxena, J. (2010). A new meta-analysis of the effects of essential oils on microbial fermentation and methane production in the rumen. *Animal Feed Science and Technology*, *161*(1-2), 37-47.

Patra, A. K., y Saxena, J. (2011). Dietary phytochemicals as rumen modifiers: A review of the effects on microbial populations, methane production and rumen fermentation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *91*(1), 1-23.

Piñeiro-Vázquez, A. T., Canul-Solís, J. R., Alayón-Gamboa, J. A., Chay-Canul, A. J., Ayala-Burgos, A. J., Solorio-Sánchez, F. J., Aguilar-Pérez, C. F., y Ku-Vera, J. C. (2017). Effects of condensed tannins from *Leucaena leucocephala* on ruminal degradation and methane production by cattle. *Journal of Agricultural Science*, *155*(5), 828-836.

Posada-Ochoa, S. L., Noguera, J. R., Rodríguez, N. M., Costa, A. L., & Reis, R. (2017). Indirect calorimetry to estimate energy requirements of growing and finishing Nellore bulls. Journal of Integrative Agriculture, 16(1), 151–161.

Rosales-Nieto, C. A., Alayón-Gamboa, J. A., & Ku-Vera, J. C. (2023). Influence of secondary metabolites from tropical trees on nutrient digestibility, ruminal fermentation kinetics, and enteric methane emissions in livestock: A review. *Animal Feed Science and Technology*, *302*, Artículo 115689.

Sari, R., Jayanegara, A., & Ridwan, R. (2024). Enteric methane mitigation strategies in ruminants and their implications on energy utilization efficiency: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production, 435*, Artículo 140311.

Siqueira, F., Torres, M., & Valente, E. (2024). *Modelos de regresión y genética cuantitativa aplicados a la eficiencia biológica de bovinos* (Documento técnico). Embrapa Gado de Corte.

Speijers, G. J. M., et al. (2004). Effects of condensed tannins on the ruminal digestion of forage and nitrogen metabolism. *Animal Feed Science and Technology*, *113*, 143-158.

Thacharodi, A., Hassan, S., Ahmed, Z. T., Singh, P., Maqbool, M., Meenatchi, R., Pugazhendhi, A., & Sharma, A. (2024). The ruminant gut microbiome vs enteric methane emission: The essential microbes may help to mitigate the global methane crisis. *Environmental Research*, *261*, Artículo 119661.

Troncoso A., H. (2020). Consumo voluntario y comportamiento ingestivo en bovinos lecheros. Revista de Producción Animal, 25(1), 12–20.

Ungersbak, N. (2021). *Metabolic utilization of volatile fatty acids in ruminants*. (Si prefieres una fuente clásica de fisiología, puedes usar: Bergman, E. N. (1990). Energy contributions of volatile fatty acids from the gastrointestinal tract in ruminants. *Physiological Reviews*, *70*(2), 567-590).

Vázquez-Carrillo, M. F., Montelongo-Pérez, H. D., González-Ronquillo, M., Castillo-Gallegos, E., & Castelán-Ortega, O. A. (2021). Partición de la energía bruta consumida y el aporte de energía metabolizable en bovinos F1. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 8(2), 1–12.

Villa-Mancera, A., Reynoso-Palomar, A., Utrera-Quintana, F., & Jaimez-Ordaz, J. (2015). Productive response of lambs fed *Crescentia alata* and *Guazuma ulmifolia* fruits in a tropical region of Mexico. *Revista Científica, FCV-LUZ*, *25*(4), 304–309.