



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO  
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**LICENCIATURA EN MEDICINA  
VETERINARIA Y ZOOTECNIA**

**TESIS**

**PARÁMETROS DE FERMENTACIÓN  
RUMINAL *IN VITRO* Y RENDIMIENTO  
PRODUCTIVO DE VACAS EN PASTOREO  
ALIMENTADAS CON SEMILLA DE CHÍA  
(*Salvia hispánica* L.)**

Para obtener el grado de  
Médica Veterinaria Zootecnista

**PRESENTA**

**Diana González Martínez**

**Director**

Dr. Rodolfo Vieyra Alberto

**Codirector**

Dr. Alfonso Longinos Muñoz Benítez

Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hgo., México, 27 de enero de 2026



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO  
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**LICENCIATURA EN MEDICINA  
VETERINARIA Y ZOOTECNIA**

**TESIS**

**PARÁMETROS DE FERMENTACIÓN  
RUMINAL *IN VITRO* Y RENDIMIENTO  
PRODUCTIVO DE VACAS EN PASTOREO  
ALIMENTADAS CON SEMILLA DE CHÍA  
(*Salvia hispánica* L.)**

Para obtener el grado de  
Médica Veterinaria Zootecnista

**PRESENTA**

**Diana González Martínez**

**Director: Dr. Rodolfo Vieyra Alberto**

**Codirector: Dr. Alfonso Longinos Muñoz Benítez**

**Comité Tutorial**

Dr. Juan Carlos Ángeles Hernández

Dr. Jesús Armando Salinas Martínez

Dr. Oscar Enrique Del Razo Rodríguez



# Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Agropecuarias

*Institute of Agricultural Sciences*

Área Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia

*Academic Area of Veterinary Medicine and Zootchnics*

Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hgo., a 27 de enero de 2026

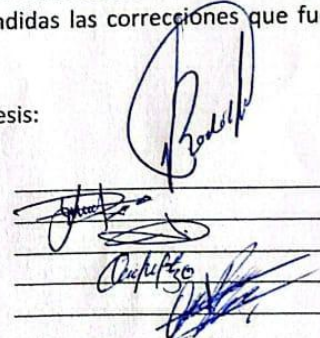
**Asunto:** Autorización de impresión

**MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO**  
**DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

Por este conducto y con fundamento en el Título Cuarto, Capítulo I, Artículo 40 del Reglamento de Titulación, le comunico que el jurado que le fue asignado a la pasante de Licenciatura en Medicina Veterinaria y Zootecnia, **Diana González Martínez**, quien presenta el trabajo de Tesis denominado **“PARÁMETROS DE FERMENTACIÓN RUMINAL IN VITRO Y RENDIMIENTO PRODUCTIVO DE VACAS EN PASTOREO ALIMENTADAS CON SEMILLA DE CHÍA (*Salvia hispánica* L.)”**, que después de revisarlo en reunión de comité de tesis, ha decidido autorizar la impresión de este, atendidas las correcciones que fueron acordadas.

Firma de conformidad de los miembros del comité de tesis:

- DIRECTOR** Dr. Rodolfo Vieyra Alberto
- CODIRECTOR** Dr. Alfonso Longinos Muñoz Benítez
- ASESOR** Dr. Juan Carlos Ángeles Hernández
- ASESOR** Dr. Jesús Armando Salinas Martínez
- ASESOR** Dr. Oscar Enrique Del Razo Rodríguez



Sin otro particular por el momento, me despido de usted.

Atentamente  
“Amor, Orden y Progreso”

**Dra. Maricela Ayala Martínez**  
**Coordinadora de Medicina**  
**Veterinaria y Zootecnia**

Avenida Universidad #133, Col. San Miguel Huatengo,  
Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hidalgo,  
México. C.P. 43775.  
Teléfono: 7717172001 Ext. 42105  
mvzjefatura@uaeh.edu.mx

“Amor, Orden y Progreso”



2025



uaeh.edu.mx

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por haber sido el espacio en donde adquirí conocimientos, experiencias y valores que me formaron como profesionista. Gracias por darme la oportunidad de cumplir una de mis más grandes metas, convertirme en Médico Veterinaria Zootecnista (MVZ).

Al Instituto de Ciencias Agropecuarias mediante el Área Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, por ofrecer una formación de calidad con espacios aptos adquirir las bases teóricas y prácticas, fomentando el amor y respeto por la vida en el campo, la ciencia y los animales, permitiéndome ejercer con orgullo la profesión de MVZ.

A mi director, Dr. Rodolfo Vieyra Alberto le expreso mi más sincero agradecimiento por su invaluable apoyo, compromiso, orientación, confianza y acompañamiento a lo largo de este proceso. Su guía y disposición al compartir sus conocimientos, fueron dos elementos fundamentales para concluir esta investigación. Gracias por creer en mí, por impulsar mi crecimiento profesional y personal enseñándome disciplina, ética, responsabilidad y amor por la profesión, haber contado con su orientación en esta etapa de mi vida es un honor que recordare con cariño y gratitud.

A mi codirector, Dr. Alfonso Longinos Muñoz Benítez agradezco sinceramente su apoyo y valioso tiempo al orientarme durante la realización de este trabajo. Además de su compromiso y disposición al compartir sus conocimientos los cuales enriquecieron esta investigación y fortalecieron mi formación profesional.

Al Rancho Canutillo, por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de llevar a cabo el desarrollo experimental de la investigación, agradezco su colaboración y disposición en cada etapa del trabajo, al permitirme aprender en un entorno real, aportando a mi formación académica.

A mis profesores por su paciencia al compartir su conocimiento y expediciones, las cuales estaban llenas de dedicación y amor por la medicina veterinaria, agradezco

sus consejos y palabras de aliento durante estos años de aprendizaje, fueron una parte esencial para culminar esta meta.

A mi familia, por ser mi mayor fortaleza, al impulsarme a seguir adelante en cada instante de esta aventura. Gracias por su amor incondicional, por creer en mí incluso cuando yo dudaba de mí misma, porque sin su apoyo, comprensión y paciencia, nada de esto habría sido posible.

A mis amigos y compañeros quienes hicieron de esta etapa algo inolvidable, gracias por las risas, los momentos compartidos y el apoyo mutuo, por las palabras de ánimo en los momentos de cansancio y desvelos, su compañía fue un refugio y una inspiración para seguir adelante haciendo que cada esfuerzo valiera la pena.

Agradezco profundamente al Rancho Universitario, por ser el espacio donde pude desarrollar y fortalecer mis capacidades como Médico Veterinario Zootecnista, y donde encontré una verdadera vocación por el trabajo en campo. Aquí no solo adquirí experiencia práctica, sino también valores, disciplina y un profundo amor por la profesión. Este lugar marcó de manera significativa mi formación, ya que tuve la fortuna de aprender de grandes mentores y de compartir el camino con excelentes compañeros, quienes con su apoyo, consejos y ejemplo contribuyeron de manera invaluable a mi crecimiento profesional y personal. Hoy, al formar parte de este equipo de trabajo, reafirmo mi compromiso con la medicina veterinaria y con la mejora constante, agradecida por todas las oportunidades que este espacio me ha brindado.

A todas aquellas personas que de alguna manera fueron parte de este camino, impulsándome a ser mejor, gracias por cada aprendizaje y momento compartido, todo lo vivido me ha ayudado a convertirme en la profesionista que orgullosamente soy hoy.

## DEDICATORIAS

A mi familia y amigos

Esta tesis representa no solo mi esfuerzo, sino también el amor, la paciencia y el apoyo de cada uno de ustedes. Gracias por acompañarme en este camino, alentarme cuando sentí que podría derrumbarme y por celebrar conmigo cada pequeño paso.

A mi mamá, por ser mi ejemplo de fortaleza, por su amor infinito y por nunca soltar mi mano. Gracias por enseñarme que todo sacrificio tiene su recompensa y que siempre vale la pena luchar por lo que deseamos.

A mi papá, aun con su ausencia vive en cada logro, en cada pensamiento y en cada recuerdo. Gracias por ser parte de mi vida y por inspirarme a seguir adelante con tus enseñanzas.

A mis hermanos Karla, Sol y Erick, por su cariño, apoyo y comprensión. Gracias por estar siempre presentes incluso cuando la distancia o el tiempo se interponen, por sus palabras, su compañía y por ser parte esencial de mi historia, además de las risas, los consejos y por recordarme siempre quién soy y de dónde vengo. Sin dudar en ningún momento que podía lograr todas mis metas.

A mis amigas Karen y Yesenia, por acompañarme a la distancia, por su amistad sincera, su apoyo incondicional y por recordarme siempre cuánto se puede querer, incluso desde lejos.

A Melany y Luz, por ser mi familia en esta etapa, por las risas, los desvelos y por compartir conmigo esta experiencia tan especial. Gracias por ser mi hogar al estar lejos de casa, por su cariño incondicional y por estar conmigo en los momentos más difíciles de esta travesía, pero también en los más felices.

A Monse, por su apoyo en la recta final, por su paciencia, su comprensión y por estar ahí cuando más lo necesité.

Y a todas las personas que formaron parte de mi formación académica y personal, gracias por su enseñanza, su ejemplo y por dejar huella en este capítulo tan importante de mi vida.

**“No pierdas tu corazón hasta que estés donde quieres estar”**

- Dream on, Dreamer.

## RESUMEN

La leche es una fuente rica de nutrimentos para el humano, aumentar el rendimiento productivo de las vacas y mejorar la calidad láctea es un desafío para los nutriólogos. El objetivo fue evaluar los parámetros de fermentación ruminal *in vitro* y rendimiento productivo de vacas en pastoreo con la adición de semilla de chía (*Salvia hispánica*) en su dieta. Se utilizaron 6 vacas multíparas encastadas con Pardo Suizo y Holstein, con un peso vivo promedio de  $543 \pm 77$  kg y una producción de leche de  $12.3 \pm 0.8$  kg por vaca al día. Las vacas fueron distribuidas de manera aleatoria en un diseño de bloques al azar llevando a cabo mediciones cada 21 días. Los tratamientos fueron: 1) Testigo = 20 h de acceso a la pradera, con 2 kg de forraje henificado en base húmeda (BH) más 2 kg de concentrado comercial en BH; y, 2) Chía = con el mismo tratamiento que el grupo testigo más la adición de 200 g de semilla de chía al día. Los datos obtenidos fueron analizados con el modelo general lineal  $Y_{ijk} = \mu + \text{Bloque}_i + Tx_j + \varepsilon_{ijk}$  con el programa estadístico SAS (2002). Se observó un mayor ( $P < 0.05$ ) consumo de pasto en vacas que no consumieron semilla de chía (*Salvia hispánica*); sin embargo, no se observaron diferencias ( $P > 0.05$ ) en la composición química de la leche ni en el rendimiento productivo de las vacas. En cuanto a los resultados *in vitro*, se observó una reducción ( $P < 0.05$ ) en el volumen de gas total y una tendencia ( $P = 0.0532$ ) a disminuir la digestibilidad de la materia seca en las dietas. En conclusión, incluir 200 g de semilla de chía en la dieta de vacas en pastoreo no modifica el desempeño productivo ni de sus componentes mayoritarios en leche, pero si reduce la producción de gas total *in vitro*.

**Palabras clave:** digestibilidad de la materia seca, leche, consumo de pasto.

## ABSTRACT

Milk is a nutrient-rich food for humans, and increasing milk yield and quality remains a challenge for nutritionists. The objective of this study was to evaluate *in vitro* ruminal fermentation parameters and the productive performance of grazing cows supplemented with chia seed (*Salvia hispanica*) in their diet. Six multiparous crossbred cows (Brown Swiss × Holstein) were used, with an average body weight of  $543 \pm 77$  kg and a milk yield of  $12.3 \pm 0.8$  kg per cow per day. The cows were randomly assigned to a randomized block design, with measurements taken every 21 days. The treatments were: (1) Control = 20 h of access to pasture, plus 2 kg of hay (as-fed basis) and 2 kg of commercial concentrate (as-fed); and (2) Chia = same as the control group plus the addition of 200 g of chia seed per day. Data were analyzed using the general linear model  $Y_{ijk} = \mu + \text{Block}_i + \text{Tx}_j + \varepsilon_{ijk}$  with the SAS statistical program (2002). A higher ( $P < 0.05$ ) pasture intake was observed in cows not supplemented with chia seed; however, no statistically significant differences ( $P > 0.05$ ) were detected in milk composition or productive performance. Regarding the *in vitro* results, a reduction ( $P < 0.05$ ) in total gas production and a trend ( $P = 0.0532$ ) toward lower dry matter digestibility were observed. In conclusion, including 200 g of chia seed in the diet of grazing cows does not modify milk yield or its major components, but it does reduce total *in vitro* gas production.

**Key words:** dry matter digestibility, milk, pasture intake.

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>1</b>
<b>DEDICATORIAS.....</b>	<b>3</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>7</b>
<b>GLOSARIO DE TERMINOS .....</b>	<b>9</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>10</b>
<b>INDICE DE GRÁFICAS.....</b>	<b>11</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS.....</b>	<b>12</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
2.1. SEMILLA DE CHÍA .....	15
2.1.1. <i>Nomenclatura y taxonomía</i> .....	15
2.1.2. <i>Descripción morfológica</i> .....	16
2.1.3. <i>Origen e historia</i> .....	17
2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA SEMILLA DE CHÍA .....	17
2.3. METABOLISMO DE NUTRIENTES EN VACAS LECHERAS.....	21
2.3.1. <i>Metabolismo de lípidos</i> .....	21
2.3.2. <i>Metabolismo de proteínas</i> .....	23
2.3.3. <i>Metabolismo de carbohidratos</i> .....	25
2.4. FERMENTACIÓN RUMINAL.....	26
2.4.1. <i>Anatomía y función de rumen</i> .....	26
2.4.2. <i>Digestibilidad: in vivo, in situ e in vitro</i> .....	27
2.5. EFECTO DE LAS OLEAGINOSAS EN LA DIETA DE VACAS.....	28
2.5.1. <i>Desempeño lechero y composición química de la leche</i> .....	28
<b>III. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>29</b>
<b>IV. HIPOTÉISIS .....</b>	<b>30</b>
<b>V. OBJETIVOS.....</b>	<b>31</b>
5.1 OBJETIVO GENERAL.....	31
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	31
<b>VI. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>32</b>
6.1. ETAPA 1: RENDIMIENTO PRODUCTIVO DE VACAS EN PASTOREO.....	32
6.1.1. <i>Localización y límite de tiempo</i> .....	32

6.1.2. Descripción de los animales y tratamientos.....	32
6.1.3. Ingredientes y manejo nutricional .....	32
6.1.4. Desarrollo experimental .....	33
6.1.5. Análisis de laboratorio.....	34
6.2. ETAPA 2: PARÁMETROS DE FERMENTACIÓN RUMINAL <i>IN VITRO</i> .....	35
6.2.1. Preparación de dietas y análisis químico proximal.....	35
6.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	37
<b>VII. RESULTADOS.....</b>	<b>38</b>
7.1. RENDIMIENTO PRODUCTIVO DE VACAS EN PASTOREO .....	38
7.3. PARÁMETROS DE FERMENTACIÓN RUMINAL <i>IN VITRO</i> .....	39
<b>VIII. DISCUSIÓN .....</b>	<b>41</b>
8.1. RENDIMIENTO PRODUCTIVO DE VACAS EN PASTOREO .....	41
8.2. PARÁMETROS DE FERMENTACIÓN RUMINAL <i>IN VITRO</i> .....	43
<b>IX. CONCLUSIÓN .....</b>	<b>45</b>
<b>X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>45</b>

## GLOSARIO DE TERMINOS

<b>Abreviatura</b>	<b>Significado</b>
<b>AG</b>	Ácidos grasos
<b>AGI</b>	Ácidos grasos insaturados
<b>AGM</b>	Ácidos grasos monoinsaturados
<b>AGS</b>	Ácidos grasos saturados
<b>AGV</b>	Ácidos grasos volátiles
<b>BH</b>	Base húmeda
<b>FDA</b>	Fibra detergente ácido
<b>FDN</b>	Fibra detergente neutro
<b>g</b>	Gramo
<b>h</b>	Hora
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>L</b>	Litro
<b>LDA</b>	Lignina detergente ácida
<b>m</b>	Metro
<b>ml</b>	Mililitros
<b>mm</b>	Milímetro
<b>MS</b>	Materia seca
<b>PC</b>	Proteína cruda
<b>V</b>	Volumen

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación taxonómica de la <i>Salvia hispánica</i> L. ....	14
Figura 2. Morfología de la planta <i>Salvia hispánica</i> L. ....	15
Figura 3. Esquema de la digestión de los lípidos. ....	22

## INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Composición química de la semilla de chía ( <i>Salvia hispánica</i> L.).....	18
Gráfica 2. Contenido mineral de la semilla de chía ( <i>Salvia hispánica</i> L.).....	18
Gráfica 3. Contenido de vitaminas en la semilla de chía ( <i>Salvia hispánica</i> L.).....	19
Gráfica 4. Contenido de ácidos grasos saturados de la semilla chía ( <i>Salvia hispánica</i> L.) .....	20
Gráfica 5. Contenido del ácido graso oleico en la semilla chía ( <i>Salvia hispánica</i> L.) .....	20
Gráfica 6. Contenido de ácidos grasos poliinsaturados en la semilla chía ( <i>Salvia hispánica</i> L.).....	20
Gráfica 7. Consumo de forraje verde de vacas en pastoreo con la adición de chía ( <i>Salvia hispánica</i> L.) en su alimentación. ....	38

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Emisión de CH<sub>4</sub>, eficiencia alimenticia e ingesta de los alimentos de vacas en pastoreo con la adición de chía (*Salvia hispánica* L.) en su alimentación. **¡Error! Marcador no definido.**

Cuadro 2. Producción, composición y rendimiento de componentes principales de la leche de vacas en pastoreo con la inclusión de semilla de chía; **¡Error! Marcador no definido.**

Cuadro 3. Parámetros de fermentación ruminal y digestibilidad *in vitro* de dietas de vacas en pastoreo con la inclusión de chía..... **¡Error! Marcador no definido.**

## INTRODUCCIÓN

La semilla de chía (*Salvia hispánica L.*) forma parte de la numerosa familia *Lamiaceae*, y es reconocida como la planta con mayor distribución mundial (Álvarez-Chávez et al., 2008). Esta semilla tiene un gran valor en la historia del México antiguo, debido a sus propiedades medicinales, religiosas, alimenticias e incluso por su uso en la pintura (Martínez et al., 2012). La chía contiene 234 g/kg de proteína cruda y 298 g/kg de aceite, este último compuesto principalmente de ácidos grasos insaturados (AGI) (Álvarez-Chávez et al., 2008).

Los ácidos grasos (AG) predominantes son: el  $\alpha$ -linolénico con 60 g/100 g de AG, el linoleico con 20 g/100 g de AG, el oleico 8 g/100 g de AG, el palmítico con 7 g/100 g de AG y el esteárico con 3 g/100 g de AG. El contenido de este compuesto presenta variaciones conforme al clima y la altitud, influyendo en la composición de la leche; por ejemplo, en regiones frías y altas hay una mayor concentración de AGI, como es el caso del omega-3 (Grancieri et al., 2019).

Los lípidos en la dieta de las vacas constituyen alrededor del 4 al 6 %, tras su paso por el rumen son transformados en ácidos grasos saturados (AGS); posteriormente, una parte de estos son metabolizados y un 50 % de estos llegarán a ser parte de la composición de la leche, mientras el resto serán utilizados como fuente de energía y precursores de cuerpos cetónicos (Wattiaux, 2005).

En el caso de la proteína cruda (PC) en la dieta de vacas constituye entre un 12 % y 18 % en la leche solo se encuentra en un 3 % (Wattiaux, 2005). Esto sugiere que el rescate de proteína se utiliza para algunas funciones metabólicas como la hipertrofia muscular o simplemente se excreta en heces y orina (Relling y Mattioli, 2003).

El uso de ingredientes alternativos, como es el caso de semillas oleaginosas enteras en la dieta de vacas, requiere del conocimiento de los procesos de fermentación ruminal, ya que pueden conllevar a cambios importantes. En el caso de dietas con alto contenido de forraje, la relación acetato:propionato se aprecia alterada, mientras que en el caso de aquellas dietas altas en concentrados muestran una

disminución del acetato y un incremento del propionato, modificando la producción total de gases durante la fermentación (Ozorio y Vinazco, 2010).

La inclusión de bajas cantidades de oleaginosas en la dieta de rumiantes no impacta de forma negativa la curva de lactación ni los niveles lactosa, grasa y proteína, aunque pueden aumentar la formación de biocomponentes beneficiosos para el consumidor (Vieyra-Alberto et al., 2022).

Conforme a lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue evaluar la producción y composición química de la leche, así como los parámetros de fermentación *in vitro*, en vacas de producción en un sistema de pastoreo adicionando semilla de chía en su dieta.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Semilla de chía

#### 2.1.1. Nomenclatura y taxonomía

La semilla de *Salvia hispánica* coloquialmente conocida como “chía” es perteneciente al orden Lamiales, familia Lamiaceae, subfamilia Nepetoideae y género *Salvia*, destacando este último como el más numeroso de la familia Lamiaceae con una cifra aproximada de 900 variedades (Grancieri et al., 2019). La *Salvia hispánica* L. es la especie con la mayor presencia a nivel global (Álvarez-Chávez et al., 2008).

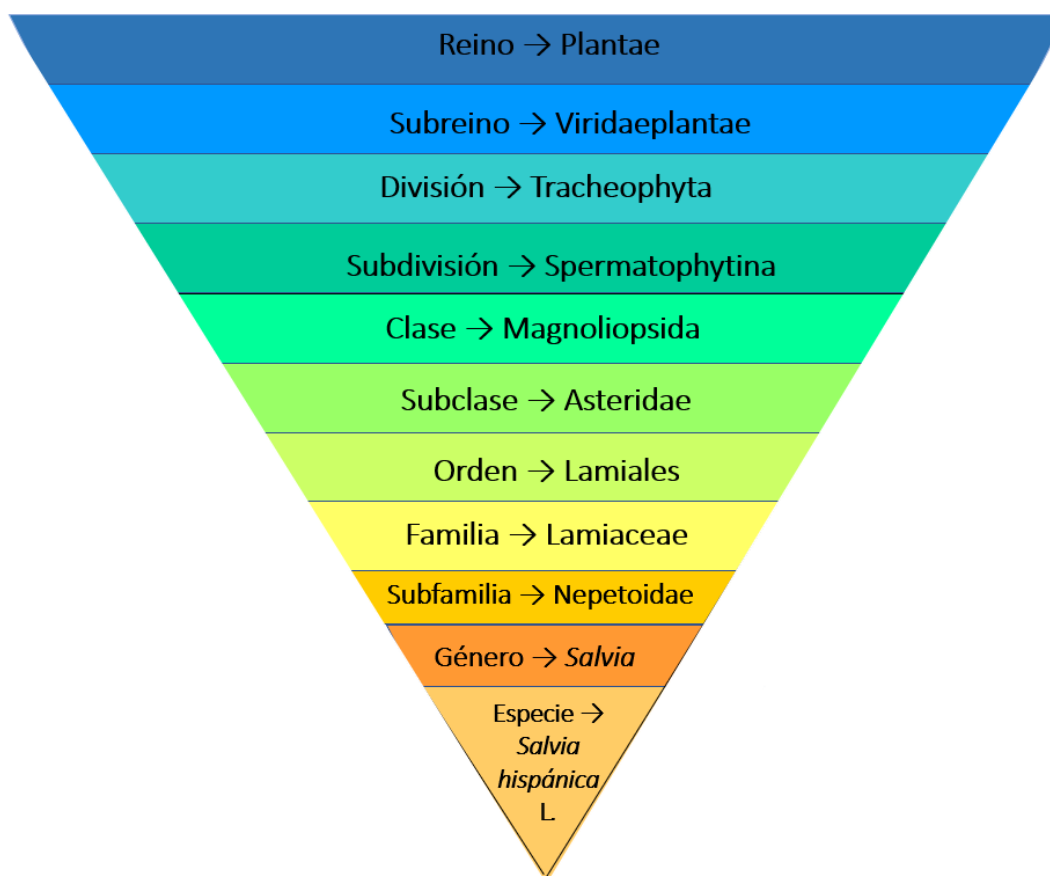
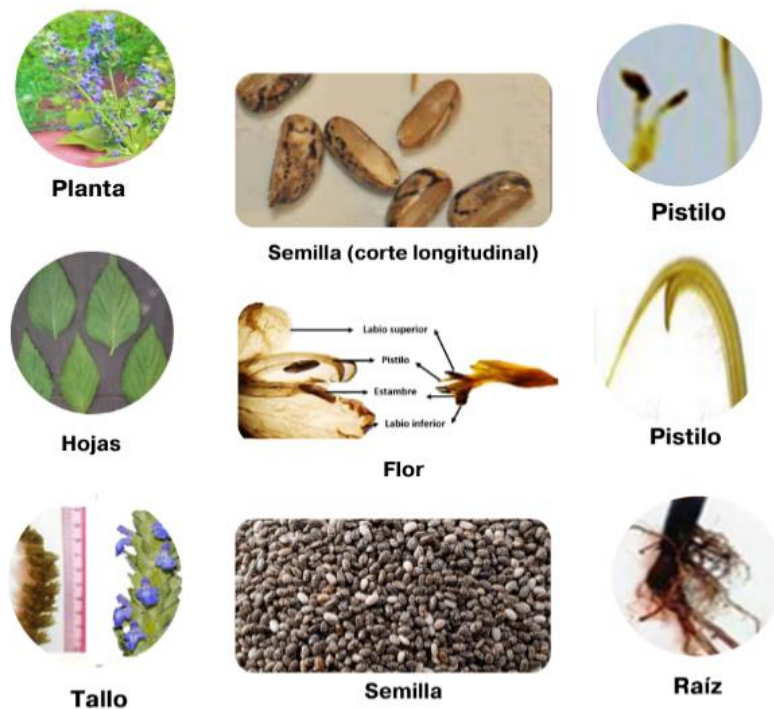


Figura 1. Clasificación taxonómica de la *Salvia hispánica* L.

Modificada de Romero (2016).

### 2.1.2. Descripción morfológica

La *Salvia hispánica* L. es una planta herbácea de producción anual, con una altura de entre 1 a 1.5 m, sus tallos son ramificados en hueco y en sección cuadrangular que cuentan con pequeñas pubescencias de color blanco, sus hojas se caracterizan por tener bordes aserrados de aproximadamente 80 a 100 mm de longitud y un ancho de entre 40 a 60 mm; además, al igual que el tallo estas también presentan pubescencias; las flores de la chía son de color blanco o azul y son hermafroditas. Los frutos de esta planta frecuentemente son indehiscentes con textura suave y brillante de tonalidad grisácea acompañada de manchas con forma irregular, estas pueden ser de color pardo grisáceo comúnmente y blanquecinas en menor frecuencia, los frutos se agrupan en cuatro clusas monospérmicas de forma oval con una longitud de 1.5 a 2 mm y 1 a 1.2 mm de diámetro (Aguas-Atlahua et al., 2017).



**Figura 2. Morfología de la planta *Salvia hispánica* L.**

Modificado de Romero (2016) y Ehsan et al., (2022).

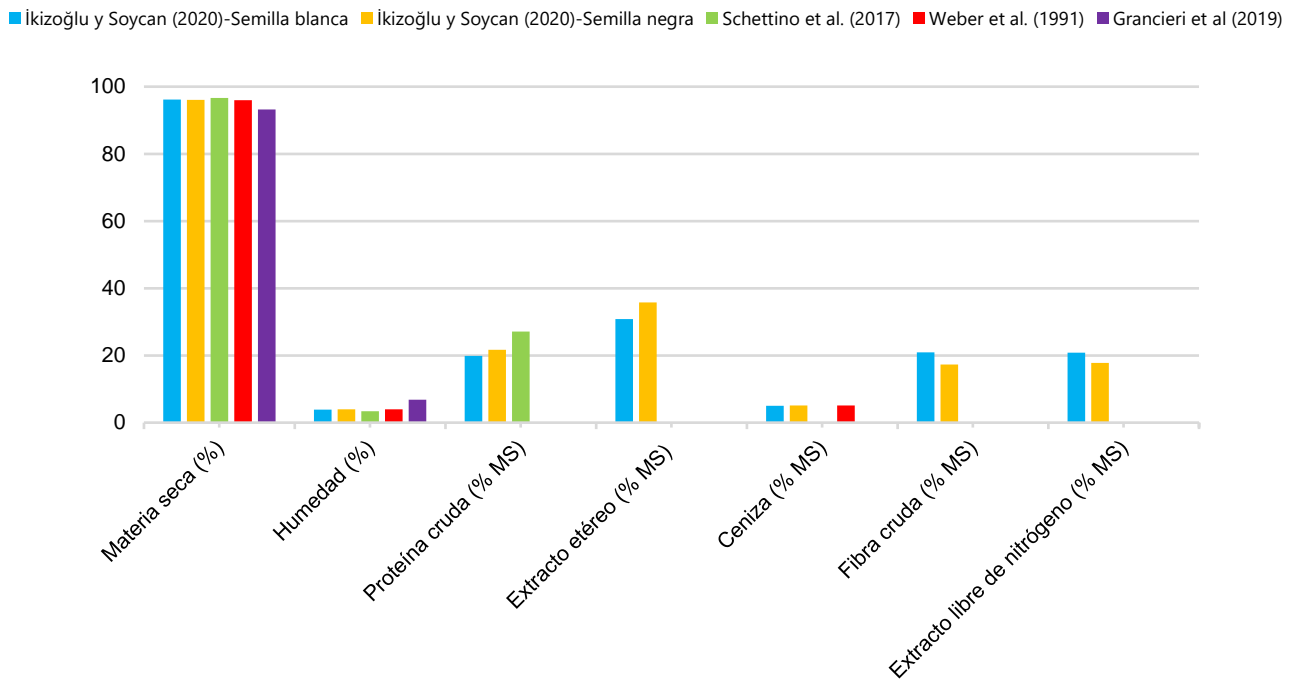
### 2.1.3. Origen e historia

La *Salvia hispánica* tiene sus orígenes en el sur de México y el norte de Guatemala (Grancieri et al., 2019). Durante el siglo XVI, para las civilizaciones precolombinas, la chía se consideraba un cultivo sumamente importante, al igual que el maíz y el amaranto (Valdivia-López y Tecante, 2015). Esta oleaginosa se utilizaba con fines medicinales, religiosos, alimentarios (Álvarez-Chávez et al., 2008) e inclusive para la elaboración de pinturas (Martínez et al., 2012). Su ingesta fue relevante por ser una gran fuente de energía, resistencia y fuerza durante batallas y exploraciones de los guerreros aztecas (Grancieri et al., 2019), mientras que los mayas la denominaban “comida de carreras” (Ikizoglu y Soycan, 2020).

El nombre “chía” es considerado una adaptación al español de “chian/chien” palabras originarias del náhuatl, cuyo significado es “aceitoso” (Kulczynski et al., 2019). Su nombre científico, es en honor a Carolus Linnaeus su descubridor, quien al verla por primera vez la confundió con una planta nativa de España (Valdivia-López y Tecante, 2015). En la época de la conquista, los españoles impidieron su cultivo (Álvarez-Chávez et al., 2008). Hoy en día, esta planta se cultiva en Argentina, Australia, Bolivia, Colombia, Guatemala, Ecuador, Europa, Paraguay, Perú, y México siendo un productor clave a nivel mundial (Grancieri et al., 2019; Kulczynski et al., 2019).

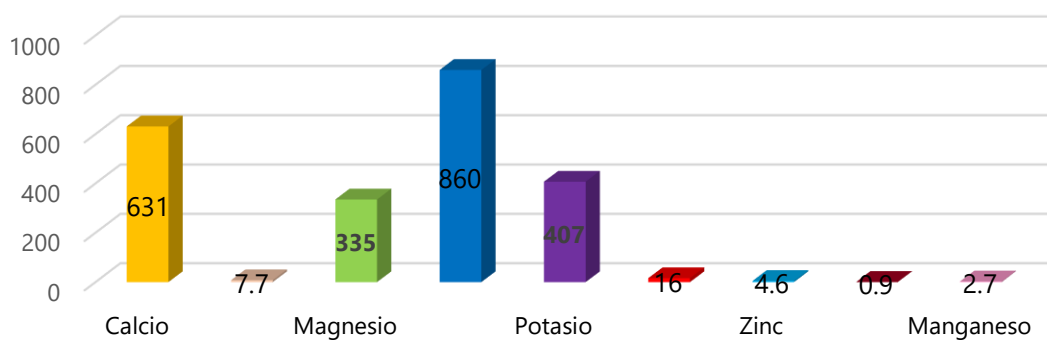
### 2.2. Composición química de la semilla de chía

La semilla de chía ha emergido como el alimento farmacéutico alternativo más consumido por el ser humano, dado que ofrece diversos beneficios para la salud, incluyendo propiedades con efecto antioxidante, anticolesterolémico, hipotensor e hipoglucémico (Grancieri et al., 2019).



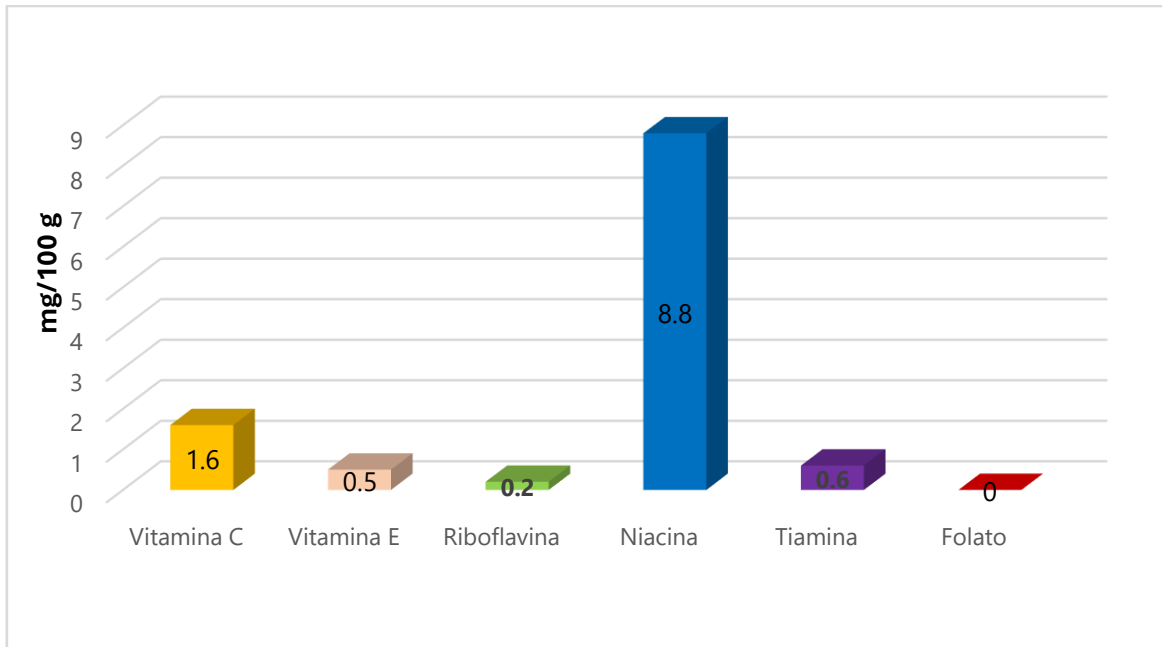
**Gráfica 1. Composición química de la semilla de chía (*Salvia hispanica* L.).**

Nota: MS = Materia Seca



**Gráfica 2. Contenido mineral de la semilla de chía (*Salvia hispanica* L.).**

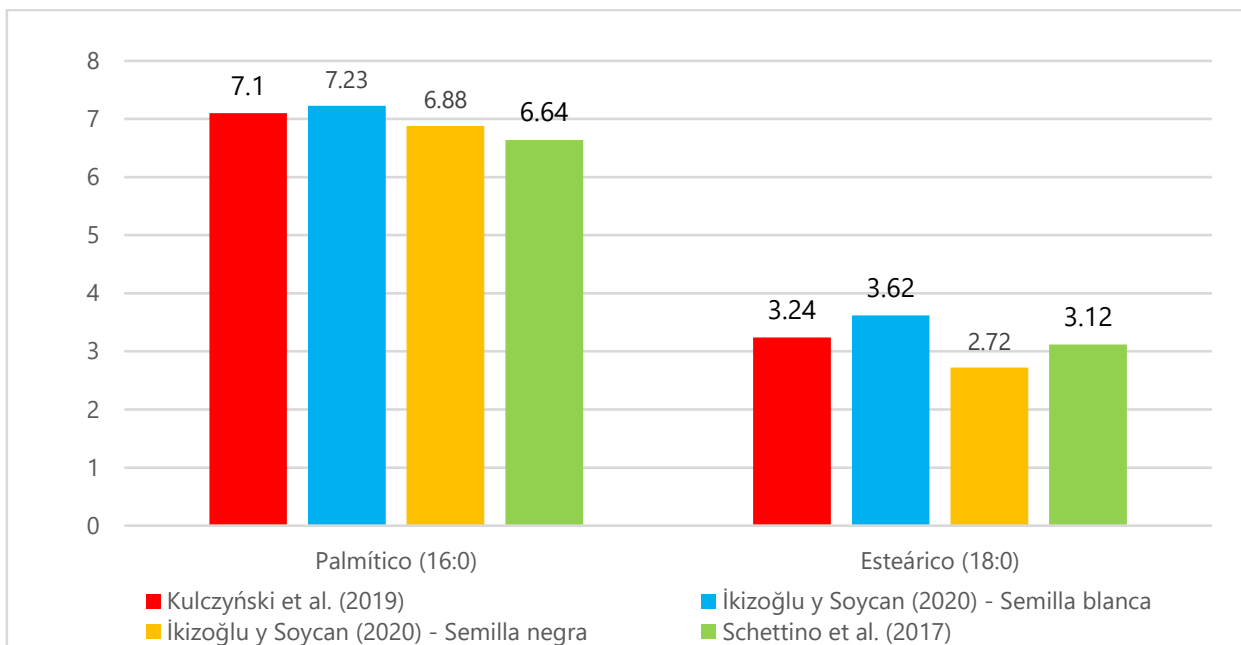
Modificado de Kulczinski et al. (2019).



**Gráfica 3. Contenido de vitaminas en la semilla de chía (*Salvia hispanica* L.)**

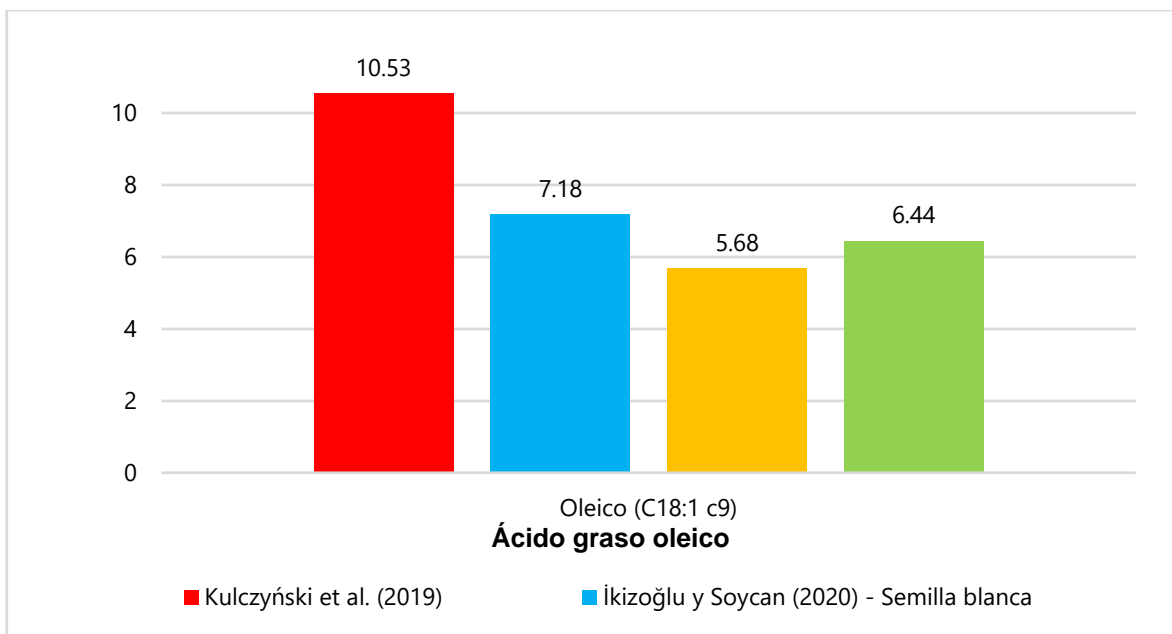
Modificado de Kulczinski et al., (2019).

La semilla de chía es apreciada por la abundancia de ácidos grasos en su estructura lipídica, los cuales se conforman de la siguiente manera: ácido graso  $\alpha$ -linolénico > ácido graso linoleico > ácido graso palmítico > ácido graso oleico > ácido graso esteárico (Valdivia-López y Tecante, 2015). Entre AGS el ácido graso palmítico (C16:0) se identifica como el componente mayoritario, seguido por el ácido graso esteárico (C18:0). Otros AGS presentes en menor proporción fueron el ácido graso laúrico (C12:0), ácido graso mirístico (C14:0), ácido graso pentadecanóico (C15:0) y ácido graso heptadecanóico (C17:0); en el caso de los de ácidos grasos monoinsaturados (AGM) el ácido graso oleico (C18:1 c9) presenta la mayor concentración, seguido del ácido graso palmitoleico (C16:1), ácido graso heptadecenóico (C17:1) y ácido graso eicosenoico (C20:1) (Kulczinski et al., 2019; İkizoğlu y Soykan, 2020; Schettino et al., 2017 y Grancieri et al., 2019).

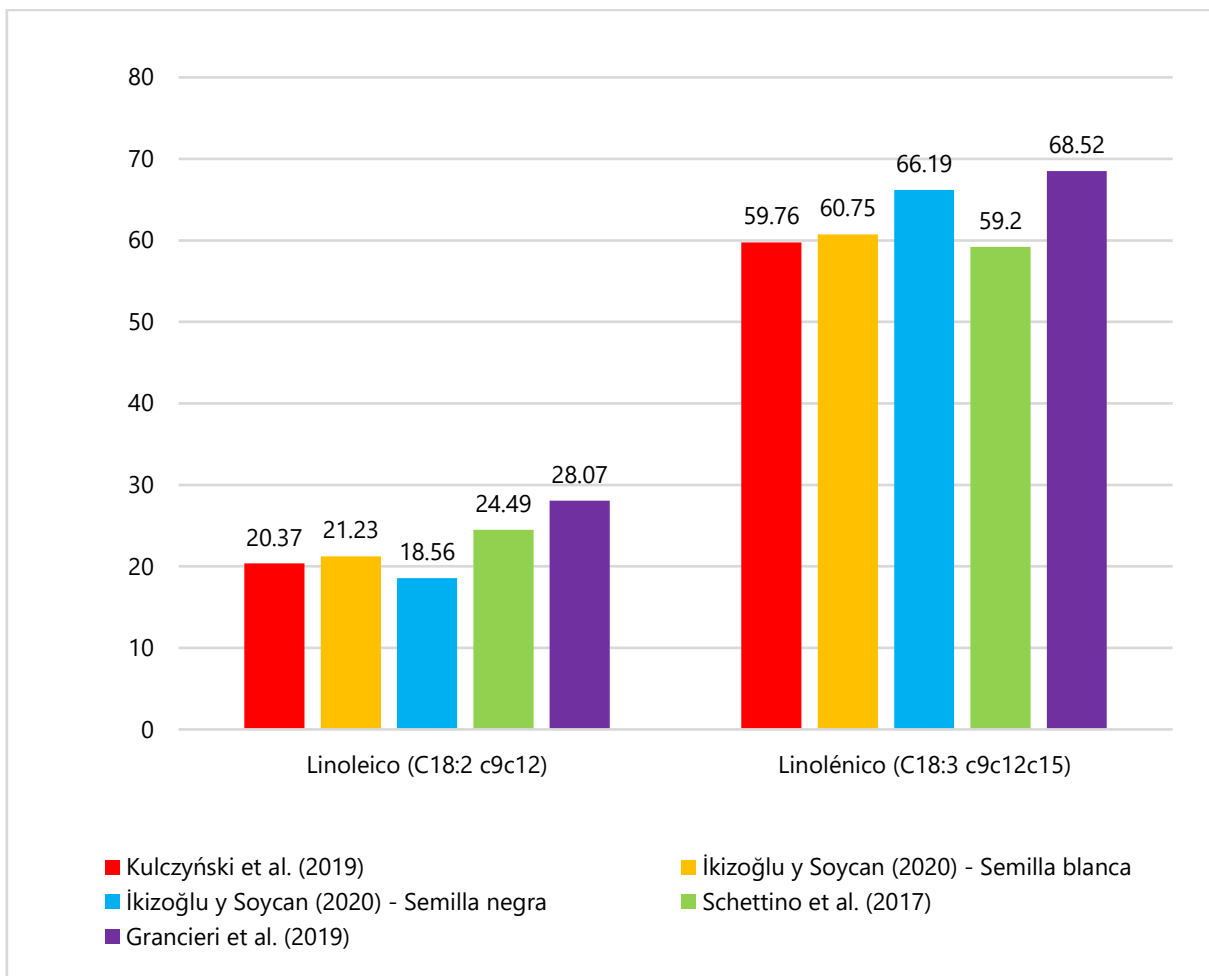


**Gráfica 4. Contenido de ácidos grasos saturados de la semilla chía (*Salvia hispánica* L.)**

Nota: AC = Ácido graso, AGS = Ácido Graso Saturado.



**Gráfica 5. Contenido del ácido graso oleico en la semilla chía (*Salvia hispánica* L.)**



**Gráfica 6. Contenido de ácidos grasos poliinsaturados en la semilla chía (*Salvia hispanica* L.)**

## 2.3. Metabolismo de nutrientes en vacas lecheras

### 2.3.1. Metabolismo de lípidos

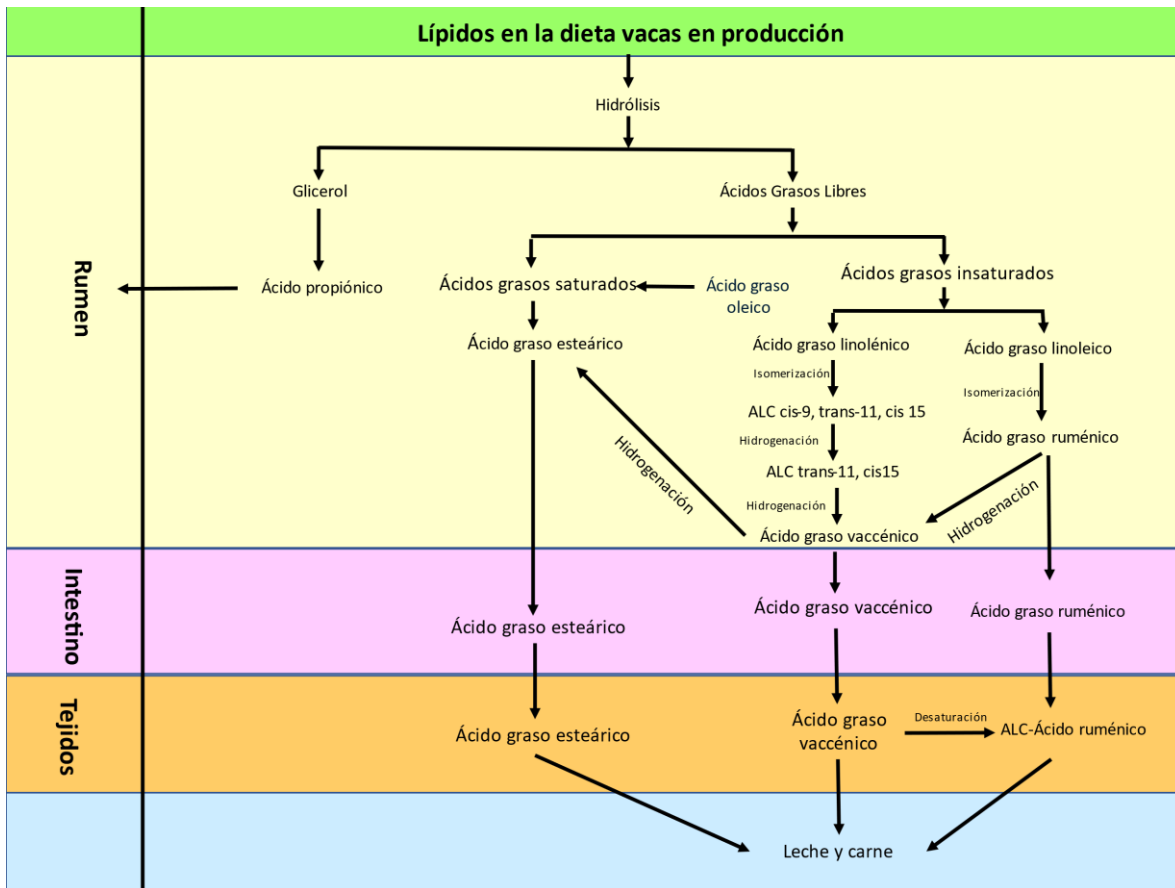
En la dieta de los bovinos, los lípidos representan entre un 4 y 6 %. Los ácidos grasos que se encuentran en el rumen (80 y 90 %) son AGS y el restante son fosfolípidos de origen microbiano, la mayor influencia en esta proporción es debido a la alimentación que reciben. Estos lípidos son lisados e hidrogenados para posteriormente ser absorbidos en el intestino delgado y transportados por el torrente sanguíneo, principalmente como triglicéridos y lipoproteínas de baja densidad (Wattiaux, 2005).

El hígado interviene en el metabolismo lipídico principalmente en situaciones de alta demanda energética, en las que los triglicéridos almacenados en el tejido adiposo se transforman en cuerpos cetónicos, los cuales actúan como fuente de energía (Wattiaux, 2005).

En cuanto al contenido de grasa en la leche, cabe mencionar que aproximadamente un 50% proviene de los lípidos ingeridos, el restante se genera por la síntesis *de novo* en la glándula mamaria (Bauman et al., 2003).

Un exceso de lípidos en la dieta, en especial los insaturados, puede interferir con la síntesis normal de ácidos grasos de cadena corta en la glándula, reduciendo así el contenido de grasa en la leche, conocido como síndrome de depresión de la grasa láctea (Bauman y Grinari, 2003). No obstante, una inclusión adecuada de lípidos de alrededor del 5 % en la dieta, puede aumentar el aporte energético, reduciendo la necesidad de concentrados ricos en carbohidratos (almidones) y evita la presencia de estrés calórico (Wattiaux, 2005).

Las dietas de vacas en producción con un adecuado nivel de inclusión de lípidos añadidos ( $\leq 5$  %) disminuye el estrés calórico (Hutj y Jorquera, 1991), evita la reducción de grasa en la leche (Vieyra-Alberto et al., 2017) sin provocar disminuciones en la producción y en la grasa de la leche, manteniéndolas, mientras mejoran el perfil de ácidos grasos en la grasa contenida en la leche (Halmemies-Beauchet-Filleau, 2023).



**Figura 3. Esquema de la digestión de los lípidos.**

Modificado de Martínez et al. (2010).

### 2.3.2. Metabolismo de proteínas

El contenido de proteína cruda (PC) en vacas lecheras en etapa de producción, oscila entre 12 y 18 %, dependiendo de su nivel productivo. Eliminando el excedente de PC a través de las heces y la orina en forma de urea. Sin embargo, un exceso de amoníaco en el rumen provocará la pérdida de peso, toxicidad e incluso la muerte del animal (Wattiaux, 2005).

La proteína que utiliza el animal tiene dos orígenes: 1) a partir de proteínas de la dieta que puede ser degradada parcial o totalmente en el rumen; y, 2) a través de la proteína microbiana sintetizada por la flora ruminal a partir del nitrógeno no

proteico y de los productos intermedios del metabolismo de los carbohidratos (Arriola Apelo y Lapierre, 2018).

El metabolismo de las proteínas en las vacas lecheras es un proceso complejo que involucra la participación coordinada de diversos órganos y tejidos. En el rumen, las proteínas dietéticas son degradadas en péptidos, aminoácidos y amonio por acción de la microbiota ruminal, los cuales son utilizados por los microorganismos para sintetizar proteína microbiana, considerada la principal fuente de aminoácidos absorbibles para el hospedador (NRC, 2021). El intestino delgado juega un papel crucial al digerir tanto la proteína microbiana como la fracción no degradada en el rumen (proteína no degradable), liberando aminoácidos que son absorbidos a través del epitelio intestinal hacia la circulación portal (Arriola Apelo y Lapierre, 2018).

Una vez en la sangre, los aminoácidos son transportados al hígado, donde se llevan a cabo los procesos de transaminación y desaminación, permitiendo la síntesis de proteínas plasmáticas, la conversión de amonio en urea y la generación de esqueletos carbonados para la gluconeogénesis o la oxidación energética (Bequette et al., 1998). Desde allí, los aminoácidos circulantes son distribuidos hacia otros tejidos periféricos, entre ellos la glándula mamaria, órgano que posee una alta demanda metabólica durante la lactancia ya que la producción de leche dependerá de la cantidad de nutrientes recibida (Duque, Quintero y Rosalia, 2011).

La glándula mamaria utiliza los aminoácidos provenientes de la circulación sanguínea para la síntesis de proteínas lácteas, principalmente caseínas,  $\alpha$ -lactoalbúmina y  $\beta$ -lactoglobulina, que constituyen cerca del 95 % del nitrógeno proteico de la leche (Arriola Apelo y Lapierre, 2018; NRC, 2021). Además, una fracción menor de los aminoácidos puede oxidarse para producir energía o participar en la formación de metabolitos esenciales para la secreción láctea. En promedio, la leche bovina contiene aproximadamente 30 g de proteína por kilogramo, reflejando la alta eficiencia metabólica del tejido mamario en la utilización de aminoácidos circulantes para la producción láctea (Bequette et al., 1998).

La formación de otros compuestos metabólicamente activos, o bien como fuente de energía mediante su oxidación parcial, dependiendo de las necesidades fisiológicas de la vaca y de la disponibilidad de nutrientes (Bequette et al., 1998; Arriola y Lapierre, 2018). La leche bovina contiene aproximadamente 30 g de proteína por kilogramo, siendo la caseína la fracción mayoritaria (alrededor del 80 %), seguida por las proteínas del suero, como  $\beta$ -lactoglobulina y  $\alpha$ -lactoalbúmina, que representan el 20 % restante (NRC, 2021).

### 2.3.3. Metabolismo de carbohidratos

Los carbohidratos presentes en la dieta de vacas lecheras son la principal fuente de energía para los procesos metabólicos y productivos. Son degradados por el microbioma del rumen y son encargados de fermentar los carbohidratos estructurales y no estructurales para la producción de energía, calor y ácidos grasos volátiles (AGV) como acetato, propionato y butirato (NRC, 2021; Moraes et al., 2020).

En condiciones óptimas, los microorganismos ruminales convierten los carbohidratos fermentables en, aproximadamente, 65 % de ácido acético, 20 % de ácido propiónico y 15 % de ácido butírico (Van Soest, 1994). Además de ser la principal fuente de energía del rumiante, estos AGV y los isoácidos derivados de la degradación de aminoácidos actúan como precursores en la síntesis de proteína microbiana, componente esencial del metabolismo proteico y de la producción de leche (Arriola y Lapierre, 2018).

Dietas para vacas en producción con exceso de concentrado pueden reducir el ácido acético en un 40 % e incrementar en igual medida el ácido propiónico, y aunque teóricamente se incrementaría el rendimiento lechero se notaría negativamente el contenido de grasa en la leche y trastornos metabólicos como hígado graso y cetosis, principalmente (Wattiaux, 2005).

Las vacas en pastoreo, al ingerir principalmente forraje que normalmente es alto en fibra, tienen una fermentación más equilibrada en el rumen, manteniendo proporciones adecuadas de AGV y contribuyendo a una producción de leche más

saludable y sostenible, favoreciendo la producción de ácido acético, esencial para la síntesis de grasa láctea, este equilibrio en la fermentación ruminal contribuye a una producción de leche con un perfil lipídico favorable y a una mejor salud ruminal (Kupczyński et al., 2024).

Los AGV generados son absorbidos a través del epitelio ruminal mediante difusión pasiva y transporte activo. El acetato y el propionato pasan directamente a la circulación portal, mientras que el butirato es convertido en cuerpos cetónicos (principalmente  $\beta$ -hidroxibutirato) antes de ingresar al torrente sanguíneo (Lemosquet et al., 2009). Una vez en el hígado, el propionato se convierte en glucosa mediante la gluconeogénesis hepática, proceso vital dado que los rumiantes absorben muy poca glucosa directamente del tracto digestivo (Reynolds et al., 2020). Esta glucosa es posteriormente liberada al torrente sanguíneo y utilizada por diversos tejidos, entre ellos la glándula mamaria (Lemosquet et al., 2009; Aschenbach et al., 2010).

En la glándula mamaria, la glucosa se utiliza no solo para la síntesis de lactosa, sino también para la formación de glicerol y ácidos grasos de cadena corta, esenciales en la síntesis de grasa láctea (Lemosquet et al., 2009). Asimismo, el acetato y los cuerpos cetónicos derivados del butirato representan las principales fuentes de carbono para la lipogénesis mamaria, contribuyendo a la composición energética y nutricional de la leche (Reynolds et al., 2020; NRC, 2021).

## **2.4. Fermentación ruminal**

### **2.4.1. Anatomía y función de rumen**

Los preestómagos de los bovinos, están conformados por el rumen, el retículo y el omaso (Osorio y Vinazco, 2010). El rumen, es el primero y el más voluminoso, ocupando la parte izquierda de la cavidad abdominal, extendiéndose desde el diafragma hasta la pelvis (Gloobe, 1989). Este órgano es el principal sitio donde se hidrolizan e hidrogenan los lípidos de origen vegetal consumidos en la dieta (Harfoot, 1981). Además de almacenar el alimento fermentado, el rumen lo dirige hacia el omaso para su separación, y mediante contracciones, también envía

partículas hacia el abomaso. Su función incluye la absorción de AGV y la eliminación de residuos no digeribles y microorganismos presentes tanto en el rumen como en el retículo (Osorio y Vinazco, 2010).

#### 2.4.2. Digestibilidad: *in vivo*, *in situ* e *in vitro*

La digestibilidad en las vacas se refiere a la porción del alimento que desaparece en el sistema digestivo, ya sea por procesos fisiológicos o mediante aproximaciones realizadas en los análisis de laboratorio; en ambos casos se debe a la acción de microorganismos del rumen (Araiza-Rosales et al., 2013).

Para obtener datos precisos sobre el proceso digestivo y metabólico, se emplean aproximaciones en animales como *in vivo* o *in situ* y en el laboratorio como *in vitro* (López, 2005). En resumen, estos procedimientos evalúan la desaparición del alimento o ingrediente que se utilice, cuantifican los residuos y miden parámetros de fermentación, así como los ácidos grasos de cadena corta y/o la producción de gases (Blummel et al., 1997).

Una de las aproximaciones de más uso en nutrición animal es la técnica de producción de gas *in vitro* la cual permite analizar la magnitud y velocidad con la que se degrada un alimento, mediante la cantidad de gas generado durante el proceso de fermentación, ofreciendo resultados cuantitativos. El método propuesto por Theodorou evalúa aspectos como la velocidad de producción de gas, la desaparición de la MS durante la incubación, así como las concentraciones de AGV y de amonio ( $N-NH_3$ ) según Posada et al. (2005).

Para llevar a cabo esta técnica, se mide la presión del gas generado en frascos de vidrio los cuales contienen el sustrato vegetal a evaluar, con sus respectivos tratamientos. A cada frasco se le agrega un inóculo ruminal estandarizado, sometido a un flujo continuo de  $CO_2$  durante un tiempo determinado. La medición de gas se realizará de manera constante durante un periodo de incubación que puede ir de 24 a 96 h, utilizando un manómetro con escala de 0 a 1 kg/cm<sup>2</sup> (Almaraz et al., 2012).

Las técnicas de producción de gas *in vitro* son valiosas, ya que permiten obtener información útil para la interpretación del valor nutricional de los alimentos, estimar

la respuesta de los animales y evaluar su impacto ambiental. En esencia, estas técnicas ayudan a determinar la cinética de producción de gas, lo cual permite entender el comportamiento de los diferentes componentes de los alimentos (Posada et al., 2005).

## **2.5. Efecto de las oleaginosas en la dieta de vacas**

### **2.5.1. Desempeño lechero y composición química de la leche**

La inclusión de 200 g de semillas de chíá en la dieta de vacas en lactación no afecta la producción de leche, pero sí mejora su perfil lipídico (Park et al., 2023). Se reduce el contenido de ácidos grasos saturados y mejora su relación con los ácidos grasos poliinsaturados y con ácidos grasos de grupo omega-3. También se observó un aumento de 48 % en ácidos grasos omega-3, de 20 % en el ácido graso linolénico y una mayor concentración de ácido linoleico conjugado (Ayerza y Coates, 2006).

Otras oleaginosas como la inclusión de semilla de algodón al 12.5 % de MS en la dieta, no afectó la producción láctea ni la proteína, pero sí influyó en el perfil de grasa de la leche incrementando la proporción del ácido graso esteárico y ácido graso oleico (Sullivan et al., 2004); así mismo, se mejora la concentración de ácidos grasos poliinsaturados y el ácido linoleico conjugado (Lawles et al., 1988; Ward et al., 2003).

## JUSTIFICACIÓN

La leche de vaca es una fuente importante de nutrientes esenciales para el desarrollo adecuado del consumidor final. Por ello, mejorar tanto su producción como su composición ha sido uno de los principales desafíos para los especialistas en nutrición animal. Para alcanzar este objetivo, se han implementado diversas estrategias nutricionales; entre ellas, el uso de semillas oleaginosas ha mostrado efectos variables en los parámetros productivos de las vacas, dependiendo en gran parte del nivel de inclusión en la dieta.

La semilla de chía debido a su alto contenido de proteínas, lípidos y carbohidratos representa una alternativa interesante en la dieta de vacas. Sin embargo, existe poca información sobre su aplicación en la alimentación de bovinos lecheros, lo que resalta la necesidad de realizar estudios que evalúen su impacto en la productividad del hato, en regiones donde las condiciones climáticas y sociales lo permitan.

En el mismo sentido, la técnica de producción de gas *in vitro* es una herramienta útil que permite evaluar la degradabilidad y digestibilidad de ingredientes poco convencionales, y tener una aproximación a la respuesta fisiológica de los animales. Es decir, esta técnica nos permite desarrollar estrategias nutricionales sin poner en riesgo la integridad de los rumiantes.

## HIPOTÉISIS

La suplementación con semilla de chíá en vacas lecheras en pastoreo mantendrá la producción diaria de leche y no alterará su composición (grasa, proteína y lactosa), ni modificará los parámetros de fermentación ruminal *in vitro*.

## OBJETIVOS

### 5.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de la suplementación con 200 g de semilla de chía entera en la dieta de vacas lecheras en pastoreo sobre el desempeño productivo y los parámetros de fermentación ruminal *in vitro*.

### 5.2 Objetivos específicos

1. Evaluar el rendimiento lechero y el contenido de grasa, proteína y lactosa en la leche de vacas en pastoreo con la adición de semilla de chía entera en su alimentación.
2. Evaluar los parámetros de fermentación ruminal *in vitro* de una dieta de vacas en producción en pastoreo con la inclusión proporcional de semilla de chía entera.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se realizó en dos etapas: 1) rendimiento productivo de vacas en pastoreo y 2) parámetros de fermentación ruminal *in vitro*. Durante esta etapa, el manejo de los animales se realizó conforme a las disposiciones establecidas por la Norma Oficial Mexicana NOM-062-ZOO-1999, la cual regula el uso y cuidado de los animales con fines de investigación científica.

### **6.1. Etapa 1: Rendimiento productivo de vacas en pastoreo.**

#### 6.1.1. Localización y límite de tiempo

El ensayo con los animales se llevó a cabo durante febrero – abril de 2019, en la unidad de producción (UP) “Rancho Canutillo”, ubicado en el municipio de Acatlán, Estado de Hidalgo, México con coordenadas en 20.181455450535843, -98.41086413149795 (Google-Maps, 2025).

Los análisis convencionales de laboratorio de las dietas y leche se llevaron a cabo en el Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, en el Laboratorio de Nutrición Animal de Investigación, ubicado en Ciudad Universitaria de Tulancingo, Hidalgo, con coordenadas 20.0638336300057, -98.38013004234072 (Google-Maps, 2025).

#### 6.1.2. Descripción de los animales y tratamientos

Se utilizaron seis vacas multíparas, encastadas de Holstein y Pardo Suizo, con un peso vivo promedio de  $543 \pm 77$  kg y una producción diaria de  $12.3 \pm 0.8$  kg de leche por vaca. Los animales fueron distribuidos de manera aleatoria en dos grupos: 1) Testigo = acceso de la pradera durante 20 horas más 2 kg de concentrado comercial en BH y 2) Chía = similar al grupo Testigo más 200 g de semilla de chía entera (*Salvia Hispánica L.*) por vaca al día. Se utilizaron cuatro periodos experimentales de 21 días (16 días de adaptación y 5 días de medición).

#### 6.1.3. Ingredientes y manejo nutricional

La alimentación de las vacas estuvo conformada por un sistema de pastoreo con praderas polifitas de *Dactylis glomerata* (Orchard Grass), *Lolium multiflorum*

(Raigrass anual), *Lolium perenne* (Raigrass perenne), *Trifolium pratense* (Trébol rojo) y *Trifolium repens* (Trébol blanco) más la inclusión de 2 kg al día de concentrado comercial (Lechero 16 %®) y 2 kg de heno de la misma pradera siendo suministrados al momento de la ordeña. Se utilizó un sistema de pastoreo rotacional, brindando un aproximado de 25 kg de materia seca por vaca al día. En todo momento las vacas tuvieron acceso a agua limpia.

#### 6.1.4. Desarrollo experimental

Los animales fueron pesados al inicio y al final de la fase de medición de cada periodo. Se evaluó la producción de biomasa en la pradera un día antes de dar inicio cada una de las cuatro fases de medición, con la finalidad de ajustar el tamaño de los potreros conforme a la asignación diaria de forraje en la pradera (kg de MS/día/vaca). En cuanto a la estimación de la biomasa forrajera, fue recolectado material vegetal presente en una superficie total de 2 m<sup>2</sup> en un cuadrante de 0.25 m<sup>2</sup> el cual fue arrojado en patrón de zigzag, en ocho ocasiones al azar en la pradera, realizando cortes del forraje dentro del cuadrante a ras de suelo para posteriormente ser pesado. Las muestras recolectadas se sometieron a un proceso de secado en un horno de microondas conforme a la metodología descrita por Teuber et al. (2007).

Se realizaron dos ordeños al día. Al finalizar el ordeño matutino, las vacas fueron movilizadas a la pradera donde permanecieron hasta la ordeña de la tarde, posteriormente se enviaron nuevamente a la pradera hasta el ordeño del día siguiente. El alimento se administró de manera individual en las vacas proporcionándoles concentrado comercial y heno a todas. A las vacas con el tratamiento de chíá se adicionaron 100 g de esta oleaginosa en cada ordeño. Se realizó el registro del alimento ofrecido menos el rechazado; así mismo, se registró la producción de leche individual por ordeño.

Se estimó el consumo de pasto de acuerdo al método propuesto por Macoon et al. (2003), calculando los requerimientos de energía neta total (ENL) del ganado lechero utilizando las ecuaciones de predicción del NRC (2001) donde se incluyeron el gasto calórico de mantenimiento, de producción de leche y porcentaje de grasa

en leche, de cambios en el peso vivo, de las actividades asociadas al pastoreo y el gasto energético del desplazamiento de los animales; y, de la energía neta aportada por los alimentos que consumieron los animales en el establo calculado a partir de las ecuaciones propuestas por Menke y Steingass (1988), basadas en el porcentaje de fibra detergente ácido. Entonces, el consumo de pasto fue calculado por diferencia entre el requerimiento y el aporte energético de los ingredientes.

Se recolectaron muestras del heno y alimento comercial, al instante en el que administraban en los comederos a los animales de manera individual, mientras que la pastura fue muestreada mediante el método de pastoreo simulado descrito por Hodgson (1964). Tras la toma de las muestras se almacenaron a  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta el momento del análisis de laboratorio. En el caso de la leche, se obtuvieron muestras de 50 ml por ordeño, las cuales se prepararon para su posterior análisis de laboratorio.

#### 6.1.5. Análisis de laboratorio

En cuanto al análisis de la composición química, las muestras recolectadas se sometieron a un proceso de secado en una estufa de aire forzado a  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24 h, posteriormente fueron molidas empleando mallas de 2 mm, para su conservación se almacenaron las bolsas de nylon. En cuanto al contenido de MS y cenizas se calculó mediante la pérdida de peso tras el secado de la muestra a  $100 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  en estufa de aire forzado durante 24 h, seguida de la incineración de las muestras en la mufla a una temperatura de  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 4 h, mientras que el contenido de proteína cruda fue determinado por el método de Kjeldalh (AOAC, 2012), en el caso de la fibra detergente ácida (FDA), fibra detergente neutra (FDN) y lignina detergente ácida (LDA) se analizaron mediante el método descrito por Van Soest et al. (1991). La composición química de la leche, constituida por grasa, proteína y lactosa, se determinó con un analizador especializado de leche LAC-SPA60®.

## 6.2. Etapa 2: Parámetros de fermentación ruminal *in vitro*

### 6.2.1. Preparación de dietas y análisis químico proximal

Se formularon dietas con las proporciones de los ingredientes ingeridos por las vacas durante cada periodo y tratamiento. El líquido ruminal se recolectó de tres bovinos diferentes pertenecientes a la unidad de producción donde se midió el rendimiento productivo, mediante sonda gástrica, posteriormente a la obtención se filtró con manta de cielo con el objetivo de eliminar macropartículas.

La producción total de gas y cinética de fermentación *in vitro* se realizó de acuerdo a la técnica de Theodorou et al. (1994). En cada periodo y tratamiento se colocaron 0.5 g de MS en viales de vidrio, de 125 ml, más 49.5 ml de una mezcla compuesta de solución mineral reducida e inóculo ruminal, en una atmósfera continua de CO<sub>2</sub> conforme al procedimiento descrito por Del Razo et al. (2015). La solución mineral se constituye de los siguientes componentes: 50 ml de NA<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> al 8 % (p/v), 75 ml de K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> al 0.6 % (p/v), 6 g de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> por litro, 0.9 g de NaCl por litro, 0.18 g de MgSO<sub>4</sub> por litro y 0.12 g de CaCl·H<sub>2</sub>O por litro; además, se añadieron 780 ml de agua destilada, 20 ml de una solución con 25 g/L de L-cisteína y 25 g/L de Na<sub>2</sub>S, y finalmente 0.4 ml de una solución con 1 g/L de resazurina. Los viales fueron sellados herméticamente con tapones de neopreno y un arillo hecho de aluminio con centro removible para ser incubados en baño María a 39 °C durante 72 h.

Las lecturas durante la incubación se realizaron con un manómetro digital (Métron<sup>®</sup>, México) en los siguientes tiempos: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 48, 60 y 72 h. Posterior a cada medición se liberó el gas acumulado. Los valores se obtuvieron en ml y se utilizaron para calcular los parámetros de la cinética de producción de gas mediante el modelo:

$$V = V_m \times \{1 - \exp(-\lambda t)\} \dots \dots \dots [1]$$

donde V es el volumen de gas producido en el tiempo t, V<sub>m</sub> es el volumen máximo alcanzado t = ∞, y S representa la constante de velocidad llamada tasa específica definida como la velocidad máxima/volumen máximo, por último, λ (L) es

interpretada como una constante de integración igual a un plazo de retraso (Almaraz-Buendía et al., 2019).

El volumen de gas generado se dedujo mediante una ecuación de regresión simple formulada de la siguiente forma:

$$y = 7.4894x - 0.6939 (R^2 = 0.99) \dots\dots\dots [2]$$

donde  $y$  representa los mililitros de gas producido, mientras que  $x$  la presión registrada, medida con un manómetro digital (Métron<sup>®</sup>, México) tomando en cuenta un rango de 0 a 1 kg/cm<sup>2</sup>. Para obtener la ecuación, se utilizó un vial de vidrio de 125 ml con 50 ml de agua y seis volúmenes conocidos (en incrementos de 5 ml), repetidos tres veces.

Al concluir el periodo de incubación se realizó la medición y registro del pH perteneciente al líquido ruminal con el medidor de pH/ORP, modelo HI-2211, Hanna Instruments<sup>®</sup>.

El material residual de los viales fue filtrado utilizando bolsas ANKOM<sup>®</sup> previamente taradas en seco y posteriormente selladas. Tanto las bolsas como el residuo se deshidrataron a 60° C durante un lapso de 24 h en una estufa de aire forzado. En el caso del porcentaje de degradación *in vitro* aparente a la MS se obtuvo mediante la fórmula:

$$100 * \text{muestra inicial} - \text{muestra residual} / \text{muestra inicial} \dots\dots\dots [3]$$

Las bolsas ANKOM<sup>®</sup> que contenían los residuos de MS fueron sellados para determinar la FDN siguiendo el método de Van Soest et al. (1991). Para obtener el porcentaje de degradación de FDN se utilizó la siguiente fórmula:

$$100 * ((\text{FDN inicial} - \text{FDN residual}) / \text{FDN inicial}) \dots\dots\dots [4]$$

La emisión de metano (CH<sub>4</sub>) (g/día) se calculó mediante la ecuación:

$$20.7 * \text{consumo total (kg) de MS al día} \dots\dots\dots [5]$$

Esta última fue propuesta para los animales que consumen grandes cantidades de forrajes frescos (Charmley et al., 2016).

### 6.3. Análisis estadístico

Los datos obtenidos del comportamiento productivo se analizaron con el modelo general lineal, utilizando un diseño de bloques completamente al azar, con apoyo del paquete estadístico SAS (2002), empleando el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + P_i + Tx_j + E_{ijk} \dots\dots\dots[6]$$

Donde:

$Y_{ijk}$ : Es el valor observado de las variables dependientes;

$\mu$ : corresponde a la media general;

$P_i$  = Efecto del periodo;

$Tx_j$  = Indica el efecto de la dieta;

$E_{ijk}$  = Error residual

Los datos de parámetros de fermentación ruminal *in vitro* fueron analizados con el modelo general lineal, utilizando un diseño completamente al azar, con apoyo del paquete estadístico SAS (2002), conforme al siguiente modelo:

$$Y_{ij} = \mu + Tx_i + E_{ij} \dots\dots\dots[7]$$

Donde:

$Y_{ij}$  = representa la respuesta de las variables dependientes;

$\mu$  = corresponde a la media general;

$Tx_i$  = Indica el efecto de la dieta;

$E_{ij}$  = Es el error del rezago.

En donde se observaron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) se utilizó la prueba de Tukey para la comparación de medias (Steel et al., 1997).

## RESULTADOS

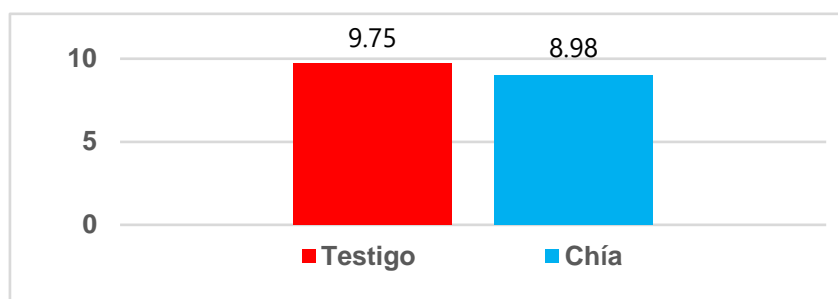
### 7.1. Rendimiento productivo de vacas en pastoreo

En el Cuadro 1 se observa el consumo de materia seca de acuerdo con el peso vivo del animal, la ingesta de pasto y la ingesta de materia seca total, además se muestra la eficiencia alimenticia y el cálculo de la producción de metano. Las vacas que no consumieron semilla de chíá incrementaron en consumo de forraje verde en la pradera ( $P < 0.05$ ; Figura 7).

**Cuadro 1. Emisión de CH<sub>4</sub>, eficiencia alimenticia e ingesta de los alimentos de vacas en pastoreo con la adición de chíá (*Salvia hispánica*) en su alimentación.**

Variables	Testigo	Chía	EEM	Valor de P
Consumo de forraje verde, kg/día	9.75 <sup>a</sup>	8.98 <sup>b</sup>	0.0735	0.0456
Consumo de materia seca total, kg/día	12.79	12.22	0.0735	0.1297
Consumo de materia seca, de acuerdo al % de peso vivo	2.38	2.30	0.0240	0.5509
Eficiencia Alimenticia, kg/kg	1.04	1.02	0.0014	0.8216
Emisión de metano*, g/día	264	253	1.5241	0.1311
Peso vivo inicial, kg	545	537	6.9317	0.7976

<sup>ab</sup>Literales distintas en la misma fila son estadísticamente diferentes ( $P < 0.05$ ). EEM = error estándar de la media. Tratamientos: 1) Testigo = 20 h de acceso a la pradera, con 2 kg de forraje henificado más 2 kg de concentrado comercial, ambos en base fresca; y, 2) Chíá = con el mismo tratamiento que el grupo testigo más la adición de 200 g de semilla de chíá al día. La emisión de metano se determinó de acuerdo con Charmley et al. (2016), con la fórmula: CH<sub>4</sub> (g/día) = 20.7\*consumo total (kg) de MS al día.



**Gráfica 7. Consumo de forraje verde de vacas en pastoreo con la adición de chíá (*Salvia hispánica* L.) en su alimentación.**

En el Cuadro 2, se muestra la composición química, la producción de leche y el rendimiento de los componentes de la leche de vacas en pastoreo alimentadas con semilla de chía (*Salvia hispánica* L.). No hubo diferencia estadísticamente significativa ( $P>0.05$ ) en ninguna de las variables.

**Cuadro 2. Producción, composición y rendimiento de componentes principales de la leche de vacas en pastoreo con la inclusión de semilla de chía.**

Variables	Testigo	Chía	EEM	Valor de P
Rendimiento lechero, kg/día	13.40	12.55	0.1225	0.2169
Composición química, g/kg				
Grasa	31	33	0.3798	0.4250
Proteína	31	31	0.0971	0.8959
Lactosa	47	47	0.1285	0.9887
Rendimiento, g/día				
Grasa	443	402	7.0239	0.2255
Proteína	423	394	1.4716	0.2607
Lactosa	640	597	6.9727	0.2548

<sup>ab</sup>Literales distintas en la misma fila son estadísticamente diferentes ( $P<0.05$ ). EEM = error estándar de la media. Tratamientos: 1) Testigo = 20 h de acceso a la pradera, con 2 kg de forraje henificado más 2 kg de concentrado comercial, ambos en base fresca; y, 2) Chía = con el mismo tratamiento que el grupo testigo más la adición de 200 g de semilla de chía al día.

### 7.3. Parámetros de fermentación ruminal *in vitro*

El Cuadro 3 se muestran los resultados de la digestibilidad *in vitro* y parámetros de fermentación ruminal. El volumen máximo de gas se obtuvo en la dieta de vacas en pastoreo en donde no se incluyó semilla de chía ( $P<0.05$ ). No hubo diferencia significativa ( $P>0.05$ ) en el resto de las variables estudiadas; sin embargo, hubo una tendencia ( $P=0.0532$ ) a reducir la digestibilidad *in vitro* de la MS con la inclusión de semilla en la dieta, por el contrario, en ese mismo tratamiento, hubo tendencia ( $P=0.0749$ ) a aumentar la digestibilidad *in vitro* de la FDN.

**Cuadro 3. Parámetros de fermentación ruminal y digestibilidad *in vitro* de dietas de vacas en pastoreo con la inclusión de chía.**

<b>VARIABLES</b>	<b>Testigo</b>	<b>Chía</b>	<b>EEM</b>	<b>Valor de P</b>
V, ml/g	189.4 <sup>a</sup>	184.8 <sup>b</sup>	0.3179	0.0163
S, ml/hora	0.028	0.028	0.0002	0.5445
L, hora	0.208	0.347	0.0374	0.5172
pH	6.797	6.815	0.0029	0.3058
Digestibilidad <i>in vitro</i> de la materia seca, %	61.3	60.3	0.1197	0.0532
Digestibilidad <i>in vitro</i> de la fibra detergente neutro, %	40.0	45.0	0.5755	0.0749

<sup>ab</sup>Literales distintas en la misma fila son estadísticamente diferentes ( $P < 0.05$ ). EEM = error estándar de la media. Tratamientos: 1) Testigo = 20 h de acceso a la pradera, con 2 kg de forraje henificado más 2 kg de concentrado comercial, ambos en base fresca; y, 2) Chía = con el mismo tratamiento que el grupo testigo más la adición de 200 g de semilla de chía al día.

## DISCUSIÓN

### **8.1. Rendimiento productivo de vacas en pastoreo**

La mayor ingesta de forraje verde se observó en las vacas del grupo testigo en comparación con aquellas suplementadas con semilla de chía. Este comportamiento podría explicarse por un mecanismo de compensación, en el cual las vacas ajustan el consumo de forraje en función del aporte energético de los suplementos ofrecidos en el establo, modificando así la ingestión en pradera de acuerdo con sus requerimientos nutricionales y la disponibilidad de nutrientes (Morales-Almaráz et al., 2011).

A pesar de lo anterior, no se detectaron diferencias en el consumo total de materia seca ni en el consumo expresado como porcentaje del peso vivo, lo que sugiere que el ajuste en la ingesta de forraje pudo compensar el aporte energético asociado a la suplementación sin comprometer la disponibilidad total de energía para la producción de leche. Asimismo, la adición de 200 g de semilla de chía por día no afectó el consumo total ni la eficiencia alimenticia. En concordancia, Jenkins y McGuire (2006) señalan que la inclusión de lípidos en niveles moderados generalmente no reduce la ingesta de alimento en vacas lecheras. Finalmente, es importante destacar que los animales no rechazaron la chía como ingrediente, lo que sugiere una buena aceptabilidad y respalda su potencial uso en formulaciones posteriores.

Asimismo, semillas ricas en ácidos grasos poliinsaturados, como linaza o girasol, son susceptibles a la oxidación lipídica; los compuestos derivados del enranciamiento y los cambios en textura asociados con niveles elevados de inclusión pueden afectar la percepción sensorial y reducir la aceptabilidad del alimento (Frolova et al., 2024; Haro et al., 2019). En conjunto, el impacto sobre la palatabilidad depende del tipo de oleaginosa, su procesamiento (extrusión, tostado o desgomado), su estabilidad oxidativa y el nivel de inclusión dentro de la dieta total; por ello, se recomienda evaluar previamente la aceptabilidad y controlar los antinutrientes para prevenir reducciones en el consumo (Evans y Lee, 2023; Gharby et al., 2024).

En relación con la producción de metano ( $\text{CH}_4$ ), no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos; sin embargo, el tratamiento suplementado con semilla de chía presentó una tendencia a valores menores. Beauchemin et al. (2008) y Hristov et al. (2013) indican que la inclusión de lípidos en la dieta puede reducir la generación de  $\text{CH}_4$ , principalmente por efectos adversos sobre microorganismos asociados a la metanogénesis y por el desplazamiento de carbohidratos fermentables. En el presente estudio, la ausencia de significancia podría atribuirse al nivel de inclusión de la chía y/o a la duración del periodo experimental, factores que pueden limitar la magnitud de la respuesta esperada.

#### Producción y composición de leche

El rendimiento lechero y los componentes de la leche (grasa, proteína y lactosa) no mostraron diferencias significativas entre tratamientos ( $P > 0.05$ ). Estos resultados coinciden con los hallazgos de Caroprese et al. (2015) y Moate et al. (2013), quienes señalan que la suplementación con fuentes vegetales ricas en ácidos grasos poliinsaturados no siempre genera cambios significativos en la producción ni en la composición de la leche, particularmente cuando se utilizan niveles moderados de inclusión.

Aun cuando en el presente estudio no se detectaron efectos significativos, se observó una tendencia a una mayor concentración de grasa en el grupo suplementado con chía (33.2 vs 31.9 g/kg), lo cual es consistente con lo descrito por Shingfield et al. (2013), quienes reportaron que los lípidos dietarios pueden estimular la síntesis de grasa láctea dependiendo del tipo y la cantidad de ácidos grasos consumidos. No obstante, la reducción numérica en el rendimiento de leche en el grupo con chía sugiere que el nivel de suplementación debe evaluarse cuidadosamente, dado que un exceso de lípidos puede tener efectos adversos sobre la productividad.

En el presente estudio, la adición de 200 g/día de semilla de chía en la dieta no modificó el contenido de grasa láctea, lo cual coincide parcialmente con lo reportado por Ayerza y Coates (2006), quienes tampoco observaron cambios en la producción de leche al suplementar vacas Holstein en pastoreo; sin embargo, a diferencia de

nuestros resultados, dichos autores documentaron una reducción del 12.3 % en el contenido de lípidos cuando las vacas consumieron 525 g/día de semilla de chía. Esta discrepancia podría atribuirse principalmente a la mayor cantidad de ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) suministrados en su estudio, ya que niveles elevados de AGPI, en especial de ácido  $\alpha$ -linolénico, alteran la biohidrogenación ruminal, afectan bacterias celulolíticas productoras de acetato y generan intermediarios trans que inhiben la síntesis de grasa de *novo* en la glándula mamaria, provocando depresión de grasa láctea (Bauman y Griinari, 2003; Bauman et al., 2011).

De manera similar, Schettino et al. (2017) realizaron un ensayo con dos tratamientos (con y sin torta de chía) en 10 vacas Holstein en el primer tercio de lactancia (PV  $500 \pm 50$  kg) bajo condiciones comparables. En sus resultados se reportaron variaciones en la proteína cruda ( $3.02 \pm 0.21$  y  $3.25 \pm 0.1$  %) y en los sólidos no grasos ( $8.5 \pm 1.24$  y  $8.98 \pm 0.28$  %), mientras que el perfil de ácidos grasos no mostró diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).

## **8.2. Parámetros de fermentación ruminal *in vitro***

### **Digestibilidad *in vitro***

En la fermentación *in vitro*, se observó que la inclusión de semilla de chía entera redujo el volumen de gas producido en comparación con el grupo testigo ( $P < 0.05$ ). Este hallazgo concuerda con lo reportado por Martin et al. (2008) y Beauchemin et al. (2008), quienes describen que la adición de aceites vegetales o de semillas ricas en lípidos puede disminuir la fermentación ruminal y la producción de gas, principalmente por la limitación de la actividad de bacterias celulolíticas y cambios en el ecosistema microbiano ruminal (Jenkins, 1993).

La reducción en el volumen de gas también coincide con lo reportado por Cieslak et al. (2024), quienes encontraron que la suplementación con semillas de chía y calabaza en dietas para ovinos lecheros disminuyó la producción de gas *in vitro*, atribuyendo este efecto a una menor actividad de bacterias celulolíticas y metanogénicas. En este sentido, la inclusión de chía podría contribuir potencialmente a la reducción de la metanogénesis, ya sea por efectos directos de

los lípidos sobre microorganismos involucrados o por el desplazamiento de sustratos fermentables, tal como se ha discutido en revisiones sobre estrategias nutricionales de mitigación (Morgavi et al., 2010; Patra, 2013).

Aunque en el presente trabajo no se observaron diferencias en la digestibilidad de MS y FDN, investigaciones recientes han mostrado que el uso de aceite de chía en sistemas in vitro incrementa la acumulación de productos intermedios de la biohidrogenación, como los ácidos grasos conjugados (CLA) y el ácido vacénico, sin alterar significativamente los parámetros de fermentación (Rivera-Acevedo et al., 2025). Estos hallazgos respaldan la idea de que el aporte lipídico proveniente de la chía puede modificar el perfil de ácidos grasos sin comprometer necesariamente la eficiencia fermentativa.

Asimismo, diversos estudios han señalado que el procesamiento de la semilla de chía, ya sea mediante molienda o fermentación, mejora su digestibilidad al incrementar la disponibilidad de lípidos y proteínas (Coorey et al., 2020). Este aspecto es relevante, ya que el uso de chía sin procesamiento, como se aplicó en este experimento, podría limitar su aprovechamiento ruminal y atenuar algunos efectos esperados sobre digestibilidad o fermentación.

En conjunto, la evidencia sugiere que la semilla de chía puede presentar un efecto dual: por un lado, reduce la fermentación gaseosa, posiblemente asociada a una menor actividad microbiana; y, por otro, ofrece la oportunidad de mejorar la calidad lipídica de los productos animales mediante un mayor aporte de ácidos grasos benéficos. En este estudio, la digestibilidad de la MS y la fibra FDN no mostró diferencias significativas entre tratamientos, aunque se observaron tendencias ( $0.05 < P < 0.10$ ) a menor digestibilidad de MS y mayor digestibilidad de FDN en el grupo con chía (Cuadro 3). Estos resultados sugieren un posible efecto modulador de la microbiota ruminal, favoreciendo ciertas poblaciones fibrolíticas y limitando parcialmente la fermentación de compuestos solubles; lo anterior es consistente con reportes que indican que los ácidos grasos poliinsaturados pueden alterar la composición microbiana y modificar el patrón de fermentación ruminal (Hristov et al., 2013).

## CONCLUSIÓN

La suplementación con 200 g de semilla de chía en la dieta de vacas lecheras en pastoreo no modificó el rendimiento lechero ni la concentración de sus componentes mayoritarios (grasa, proteína y lactosa); sin embargo, redujo la producción total de gas en la fermentación ruminal *in vitro*. En conjunto, estos resultados sugieren que, bajo las condiciones evaluadas, la semilla de chía puede incorporarse como ingrediente en la alimentación de vacas en producción sin comprometer el desempeño productivo y con un posible efecto modulador de la fermentación ruminal. Por ello, en aquellos sistemas donde las condiciones agroclimáticas, logísticas y socioeconómicas lo permitan, la chía representa una alternativa factible para su inclusión en dietas de vacas en pastoreo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguas Atlahua, A., Xingú López, A., González Huerta, A., de la Cruz Torrez, E., Sangerman J, D. M., Orozco de Rosas, G., y Rubí Arriaga, M. (2017). Chía

- (*Salvia hispanica* L.), situación actual y tendencias futuras. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(7), 1619–1629.
- Almaraz, J. J., García, M. A. y Aranda, E. (2012). Técnicas *in vitro* de digestibilidad ruminal y su aplicación en la evaluación de alimentos. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 3(1), 45–58.
- Almaráz-Buendía, I., Hernández-Escalona, A., González-Tenorio, R., Santos-Ordoñez, N., Espino-García, J. J., Martínez-Juárez, V., Meza-Nieto, M. A., and Campos Montiel, R. G. (2019). Producing an emulsified meat system by partially substituting pig fat with nanoemulsions that contain antioxidant compounds: The effect on oxidative stability, nutritional contribution, and texture profile. *Foods*, 8(9), 357. <https://doi.org/10.3390/foods8090357>.
- Álvarez-Chávez, L. M., Valdivia-López, M. D. L. A., Aburto-Juarez, M. D. L., and Tecante, A. (2008). Chemical characterization of the lipid fraction of Mexican chia seed (*Salvia hispanica* L.). *International Journal of Food Properties*, 11(3), 687-697. <https://doi.org/10.1080/10942910701622656>.
- Araiza-Rosales, J. R., Mendoza-Martínez, G. D., Rojo-Rubio, R., y Crosby-Galván, M. M. (2013). Evaluación de la digestibilidad *in vivo*, *in situ* e *in vitro* de forrajes tropicales. *Técnica Pecuaria en México*, 51(1), 23–34.
- Arriola Apelo, S. I., and Lapiere, H. (2018). Amino acid metabolism in dairy cows and their regulation in milk synthesis. *Animal*, 12(s2), s72–s81.
- Aschenbach, J. R., Kristensen, N. B., Donkin, S. S., Hammon, H. M., and Penner, G. B. (2010). Gluconeogenesis in dairy cows: The secret of making sweet milk from sour dough. *Annual Review of Animal Biosciences*, 8, 55–77.
- Association of Official Analytical Chemists [AOAC]. (2012). *Official Methods of analysis* (19th ed). AOAC: International, USA. pp: 34-36.
- Ayerza, R., y Coates, W. (2006). Influence of chia on total fat, cholesterol, and fatty acid profile of Holstein cow's milk. *Annals of Nutrition & Metabolism*, 50(1), 24–31.

- Bauman, D. E., Harvatine, K. J., and Lock, A. L. (2011). Nutrigenomics, rumen-derived bioactive fatty acids, and the regulation of milk fat synthesis. *Annual Review of Animal Biosciences*, 1, 1–27.
- Bauman, D. E., y Griinari, J. M. (2003). Nutritional regulation of milk fat synthesis. *Annual Review of Nutrition*, 23, 203–227. <https://doi.org/10.1146/annurev.nutr.23.011702.073408>.
- Beauchemin, K. A., Kreuzer, M., O'Mara, F., and McAllister, T. A. (2008). Nutritional management for enteric methane abatement: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48(2), 21–27.
- Bequette, B. J., Backwell, F. R. C., and Crompton, L. A. (1998). Current concepts of amino acid and protein metabolism in the mammary gland of the lactating ruminant. *Journal of Dairy Science*, 81(9), 2540–2559.
- Blümmel, M., Makkar, HPS and Becker, K. (1997). In vitro gas production: A technique revisited. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 77 (1-5), 24-34.
- Caroprese, M., Ciliberti, M. G., Albenzio, M., Annicchiarico, G. and Sevi, A. (2015). Dietary polyunsaturated fatty acids from flaxseed affect immune and inflammatory responses in dairy sheep. *Journal of Dairy Science*, 93(9), 3883–3890.
- Charmley, E., Williams, S. R. O., Moate, P. J., Hegarty, R. S., Herd, R. M., Oddy, V. H., Reyenga, P., Staunton, K. M., Anderson, A. and Hannah, M. C. (2016). A universal equation to predict methane production of forage-fed cattle in Australia. *Animal Production Science*, 56, 169–180.
- Cieslak, A., El-Sherbiny, M., Bryszak, M., Stochmal, A., Oleszek, W., Pers-Kamczyc, E., and Szumacher-Strabel, M. (2024). Effect of chia and pumpkin seeds on in vitro ruminal fermentation, microbial populations, and methane production. *Animals*, 14(3), 512.

- Coorey, R., Tjoe, A. and Jayasena, V. (2020). Effect of chia seed processing on nutrient digestibility and bioaccessibility: An *in vitro* study. *Foods*, 9(3), 374.
- Del Razo, O. E., Almaraz, I., Espinosa, V., Soriano, R., Miranda, L. A., Arias, L., Guan, L., Buendía, G. y Peláez, A. (2015). Análisis comparativo de la fermentación *in vitro* de cladodios desperdiciados (*Opuntia spp.*), alfalfa y henos de avena. *South African Journal of Animal Science*, 45(5), 470–475. <https://doi.org/10.4314/sajas.v45i5>
- Ehsan, M., Abo Zeid, A. E., Abdel Ghani, A., Mahmoud, M. Y. and Abdallah, R. H. (2022). Macro and micromorphological study of *Salvia hispanica* L. cultivated in Egypt. *Zagazig Journal of Pharmaceutical Sciences*, 31(1), 1–13. [https://zjps.journals.ekb.eg/article\\_228190\\_03ede1588a3f2ecc8abd8fe98c7b9269.pdf](https://zjps.journals.ekb.eg/article_228190_03ede1588a3f2ecc8abd8fe98c7b9269.pdf).
- Evans, R. D., and Lee, M. R. F. (2023). Feed palatability, lipid supplementation, and processing effects on intake and performance of ruminants: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 298, 115591.
- Frolova, N., Bannikova, A., Popova, N., and Smirnova, E. (2024). Oxidative stability and antioxidant activity of flaxseed oil structured in oleogel systems. *Foods*, 13(2), 214.
- Gharby, S., Harhar, H., Bouzoubaa, Z., and Charrouf, Z. (2024). Oxidative stability of edible oils: A comprehensive review of mechanisms and prevention strategies. *Food Chemistry*, 430, 137093.
- Gloobe, H. (1989). Anatomía aplicada del bovino. CATIE.
- Google-Maps. (2025). Rancho Canutillo [Mapa]. Google Maps.<https://www.google.com/maps/place/Rancho+Canutillo/>
- Grancieri, M., Martino, H. S. D. and González de Mejía, E. (2019). Chia seed (*Salvia hispanica* L.) as a source of proteins and bioactive peptides with

health benefits: A review.  
<https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12423>.

- Halmemies-Beauchet-Filleau, A., Jaakkola, S., Kokkonen, T., Turpeinen, A. M., Givens, D. I. and Vanhatalo, A. (2023). Milled rapeseeds and oats decrease milk saturated fatty acids and ruminal methane emissions in dairy cows without changes in product sensory quality. *Frontiers in Animal Science*, 4, Article 1278495. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1278495>.
- Harfoot, C. G. (1981). Lipid metabolism in the rumen. *Lipid metabolism in ruminant animals*, 21-55. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(2), 480-499. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-023789-3.50006-4>
- Haro, A., Lara, L., Mendoza, M. G. D., Bárcena, R., and González, M. S. (2019). Effect of oilseed supplementation on milk yield, fatty acid profile, and oxidative stability in dairy cows. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 28(4), 315–325.
- Hodgson, J. (1964). The grazing behavior of cattle and sheep and the assessment of herbage intake. *Journal of Agricultural Science*, 63(2), 265–271.
- Hristov, A. N., Oh, J., Firkins, J. L., Dijkstra, J., Kebreab, E., Waghorn, G., Adesogan, A. T., Tricarico, J. M., Rotz, A., Montes, F., Ott, T., Henderson, B., Makkar, H. P. S. and Dijkstra, J. (2013). Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *Journal of Animal Science*, 91(11), 5045–5069. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6585>
- Hutj, B. R. and Jorquera, P. (1991). Response of lactating dairy cows to fat supplementation during heat stress. *Journal of Dairy Science*, 74(2), 394–402.
- İkizoğlu, E. y Önenç, S. S. (2020). Estimación de algunos valores nutricionales de semillas de quinua, chía, teff, frijol mungo y trigo sarraceno para rumiantes mediante métodos in vitro. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 57(4), 519–527. <https://doi.org/10.20289/zfdergi.670262>.

- Jenkins, T. C. (1993). Lipid metabolism in the rumen. *Journal of Dairy Science*, 76(12), 3851–3863. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77727-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77727-9)
- Jenkins, T. C. and McGuire, M. A. (2006). Major advances in nutrition: impact on milk composition. *Journal of Dairy Science*, 89(4), 1302–1310.
- Kulczyński, B., Kobus-Cisowska, J., Taczanowski, M., Kmiecik, D. and Gramza-Michałowska, A. (2019). The chemical composition and nutritional value of chia seeds—Current state of knowledge. *Nutrients*, 11(6), 1242. <https://doi.org/10.3390/nu11061242>.
- Kupczyński, R., Pacyga, K., Lewandowska, K., Bednarski, M., and Szumny, A. (2024). Milk Odd- and Branched-Chain Fatty Acids as Biomarkers of Rumen Fermentation. *Animals*, 14(11), 1706.
- Kupczyński, R., Szumiło, G. and Adamski, M. (2024). Effect of roughage type and feeding system on rumen fermentation and milk composition in dairy cows. *Animals*, 14(1), 89.
- Lawless, F., Murphy, J. J. and Harrington, D. (1988). The effect of dietary fat supplements on milk yield and composition of dairy cows. *Irish Journal of Agricultural Research*, 27(1), 49–57.
- Lemosquet, S., Hurtaud, C. and Rulquin, H. (2009). Metabolism of glucose, lipids, and amino acids in the mammary gland of dairy cows. *Animal*, 3(8), 1125–1139.
- López, S. (2005). Técnicas in vitro para la estimación de la digestibilidad de alimentos para rumiantes. *Archivos de Zootecnia*, 54(206), 155–164.
- Macon, B., Sollenberger, E., Moore, E., Staples, R., Fike, H. and Portier, M. (2003). Comparison of three techniques for estimating the forage intake of lactating dairy cows on pasture. *Journal of Animal Science*, 81: 2357-2366. <https://doi.org/10.2527/2003.8192357x>.
- Martin, C., Rouel, J., Jouany, J. P., Doreau, M. and Chilliard, Y. (2008). Methane output and diet digestibility in response to feeding dairy cows crude linseed,

- extruded linseed, or linseed oil. *Journal of Animal Science*, 86(10), 2642–2650.
- Martínez Marín, A. L., Pérez Hernández, M., Pérez Alba, L., Gómez Castro, G. y Carrión Pardo, D. (2010). Metabolismo de los lípidos en los rumiantes. *REDVET: Revista Electrónica de Veterinaria*, 11(1), 1–21.
- Martínez, M. L., Marín, M. A., Faller, C. M. S., Revol, J., Penci, M. C. and Ribotta, P. D. (2012). Chia (*Salvia hispanica* L.) oil extraction: Study of processing parameters. *LWT-Food Science and Technology*, 47(1), 78-82. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.12.032>.
- Menke, H. H. and Steingass, H. (1988). Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and in vitro gas production using rumen fluid. *Animal Research and Development*, 28, 7–55.
- Moate, P. J., Williams, S. R. O., Grainger, C., Hannah, M. C., Eckard, R. J., Auldist, M. J. and Wales, W. J. (2013). Influence of feeding lipid supplements on methane emissions from dairy cows. *Animal Production Science*, 54(9), 1210–1216.
- Moraes, L. E., Strathe, A. B. and Fadel, J. G. (2020). Rumen fermentation and energy metabolism in dairy cows: Modelling approaches and applications. *Journal of Dairy Science*, 103(1), 1–16.
- Morgavi, D. P., Forano, E., Martin, C., and Newbold, C. J. (2010). Microbial ecosystem and methanogenesis in ruminants. *Animal*, 4(7), 1024–1036. <https://doi.org/10.1017/S1751731110000546>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine [NCR]. (2021). *Nutrient Requirements of Dairy Cattle* (8th rev. ed.). National Academies Press.
- NRC. (2001). *Nutrient requirements of dairy cattle* (7th ed.). National Academy Press.

- Osorio, J. H. y Vinazco, J. (2010). El metabolismo lipídico bovino y su relación con la dieta, condición corporal, estado productivo y patologías asociadas. *Biosalud*, 9(2), 56–66. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1657-95502010000200007](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-95502010000200007).
- Park, Y., Lee, J. and Kim, H. (2023). Effect of chia seed supplementation on milk fatty acid composition and oxidative stability in dairy cows. *Frontiers in Animal Science*, 4, Article 1212345.
- Patra, A. K. (2013). The effect of dietary fats on methane emissions, and its other effects on digestibility, rumen fermentation and lactation performance in cattle: A meta-analysis. *Livestock Science*, 155(2–3), 244–254. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.05.023>
- Posada, S. L., Noguera, R. R. y Gutiérrez, L. A. (2005). Evaluación de la cinética de fermentación ruminal *in vitro* mediante la técnica de producción de gas. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 18(3), 237–246.
- Relling, A. E., Mattioli, G. A., Picco, S. J., y Giuliadori, M. J. (2013). Fisiología digestiva y metabólica de los rumiantes. La Plata, Argentina: CCB Academic Press.
- Reynolds, C. K., Crompton, L. A. and France, J. (2020). Metabolic interactions between the liver and mammary gland in lactating dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, 268, 114583.
- Rivera-Acevedo, D. R., López, D., Hernández, F., Martínez, A., Gutiérrez, R. and Ruiz, J. (2025). *In vitro* fermentation and biohydrogenation with chia oil supplementation in ruminant diets. *Veterinary Medicine and Science*, 11(2), 317–326.
- Romero, M. A. (2016). Identificación y clasificación de la chía (*Salvia hispanica* L.) silvestre y comercial mediante el perfil de proteínas obtenido por electroforesis capilar.

- Schettino, B., Vega, S., Gutiérrez, R., Escobar, A., Romero, J., Domínguez, E. and González-Ronquillo, M. (2017). Fatty acid profile of goat milk in diets supplemented with chia seed (*Salvia hispanica* L.). *Journal of Dairy Science*, 100(8), 6256–6265. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12785>.
- Shingfield, K. J., Bernard, L., Leroux, C. and Chilliard, Y. (2013). Role of trans fatty acids in the nutritional regulation of mammary lipogenesis in ruminants. *Animal*, 7(s1), 112–122.
- Steel, R. G. D., Torrie, J. H. and Dickey, D. A. (1997). *Principles and procedures of statistics: A biometrical approach* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Sullivan, H. M., Bernard, J. K., Amos, H. E., Jenkins, T. C. and Rowe, D. E. (2004). Performance of lactating dairy cows fed whole cottonseed with elevated concentrations of free fatty acids in the oil. *Journal of Dairy Science*, 87(3), 665–671.
- Teuber, K. N., Balocchi, L. O. y Parga, M. J. (2007). *Manejo del Pastoreo*. Imprenta America. Chile. p.129.
- Theodorou, M. K., Williams, B. A., Dhanoa, M. S., McAllan, A. B. and France, J. (1994). A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 48, 185–197.
- Valdivia-López, M. Á. and Tecante, A. (2015). Chia (*Salvia hispanica*): A review of native Mexican seed and its nutritional and functional properties. *Advances in Food and Nutrition Research*, 75, 53–75. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2015.06.002>.
- Van Soest, P. J. (1994). *Nutritional Ecology of the Ruminant* (2nd ed.). Cornell University Press.
- Van Soest, P. J., Robertson, J. B. and Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583–3597.

- Vargas-Bello-Pérez, E. and Garnsworthy, P. C. (2013). Effects of dietary polyunsaturated fatty acids on methane production by dairy cows: a review. *Livestock Science*, 152(2–3), 157–169.
- Vieyra-Alberto, R., Zetina-Martínez, R. E., Olivares-Pérez, J., Galicia-Aguilar, H. H., Rojas-Hernández, S. and Ángeles-Hernández, J. C. (2022). Effect of soybean grain (*Glycine max* L.) supplementation on the production and fatty acid profile in milk of grazing cows in the dry tropics of Mexico. *Tropical Animal Health and Production*, 54(1), 1-9.
- Vieyra-Alberto, Rodolfo, Arriaga-Jordán, Carlos M., Domínguez-Vara, Ignacio A., Bórquez-Gastelum, José L., y Morales-Almaráz, Ernesto. (2017). Efecto del aceite de soya sobre la concentración de los ácidos grasos vaccenico y ruménico en leche de vacas en pastoreo. *Agrociencia*, 51(3), 299-313.
- Ward, A. T., Wittenberg, K. M. and Przybylski, R. (2003). Bovine milk fatty acid profiles produced by feeding diets containing solin, flax, and canola. *Journal of Dairy Science*, 86(3), 764–775.
- Wattiaux M. (2005). Guía Técnica Lechera. Instituto Babcock para la investigación y desarrollo internacional de la industria lechera.
- Wattiaux, M. A. (2005). Secreción de leche por la ubre de una vaca lechera. En *esenciales lecheras. Guías técnicas lecheras*. Instituto Babcock (pp.77-80). Wisconsin, E.U.A.: Universidad de Wisconsin-Madison.