



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS ZOOTÉCNICAS Y
SALUD ANIMAL**

TESIS

**EFFECTO DE LOS GRANOS HÚMEDOS DE
CERVECERÍA SOBRE LOS PARÁMETROS DE
FERMENTACIÓN RUMINAL Y COMPOSICIÓN
QUÍMICA DE LA LECHE**

Para obtener el grado de
Maestra en Ciencias Zootécnicas y Salud Animal

PRESENTA

MVZ. Daniela Sánchez Otero

Director

Dr. Rodolfo Vieyra Alberto

Codirector

Dr. Juan Carlos Ángeles Hernández

Tulancingo de Bravo, Hgo., México, enero de 2025



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS ZOOTÉCNICAS Y
SALUD ANIMAL**

TESIS

**EFFECTO DE LOS GRANOS HÚMEDOS DE
CERVECERÍA SOBRE LOS PARÁMETROS DE
FERMENTACIÓN RUMINAL Y COMPOSICIÓN
QUÍMICA DE LA LECHE**

Para obtener el grado de
Maestra en Ciencias Zootécnicas y Salud Animal

PRESENTA

MVZ. Daniela Sánchez Otero

Director: Dr. Rodolfo Vieyra Alberto

Codirector: Dr. Juan Carlos Ángeles Hernández

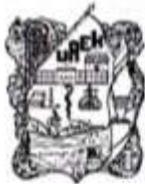
Asesores:

Dr. Alfonso Longinos Muñoz Benítez

Dr. Oscar Enrique Del Razo Rodríguez

PhD. Rafael Alejandro Palladino

Tulancingo de Bravo, Hgo., México, enero de 2025



Asunto: Autorización de impresión

Mtra. Ojuky del Rocío Islas Maldonado
Directora de Administración Escolar de la UAEH

El Comité Tutorial de la TESIS del programa educativo de posgrado titulado "EFECTO DE LOS GRANOS HÚMEDOS DE CERVECERÍA SOBRE LOS PARÁMETROS DE FERMENTACIÓN RUMINAL Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA LECHE", realizado por la sustentante, DANIELA SÁNCHEZ OTERO con número de cuenta 339177 perteneciente al programa de Maestría en Ciencias Zootécnicas y Salud Animal, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el artículo 110 del reglamento de estudios de posgrado, tiene bien a extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que la sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"
 Tulancingo de Bravo, Hidalgo, a 16 de enero de 2025

El Comité Tutorial

DR. RODOLFO VIEYRA ALBERTO
 Director

DR. JUAN CARLOS ÁNGELES HERNÁNDEZ
 Codirector

DR. ALFONSO LONGINOS MUÑOZ BENÍTEZ
 Asesor

DR. OSCAR ENRIQUE DEL RAZO RODRÍGUEZ
 Asesor

DR. RAFAEL ALEJANDRO PALLADINO
 Asesor

Avenida Universidad Km. 1 s/n, Exhacienda
 Aquetzalpa, Tulancingo de Bravo, Hidalgo,
 México; C.P. 43600
 Teléfono: 771 71 72000 ext 2440
 mec.zysa@uaeh.edu.mx



I. AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por la beca otorgada para el desarrollo de esta Maestría.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por ser mi casa de estudios desde la licenciatura y brindar las instalaciones que permitieron mi crecimiento profesional.

Al Instituto de Ciencias Agropecuarias por permitir el acceso a sus instalaciones para desarrollo de esta investigación.

A la Maestría y a sus profesores, por compartir su conocimiento, realizar aportaciones y contribuir positivamente en esta investigación.

Al Banco Santander por otórgame una de las becas Santander de Movilidad Internacional 2023 que fue un apoyo importante al realizar la estancia en Argentina.

A la Fundación Instituto de la Leche (FIL) de Argentina por permitirme realizar una estancia de investigación y al Ing. Vicente Cazarez, presidente de ésta, por todo el apoyo, tiempo y experiencia compartido, trabajar y conocer sus campos fue una gran oportunidad.

Al Dr. Alejandro Palladino, por ser el enlace entre ICAp y la Fundación, por estar pendiente en cada paso para salir de México y hasta mi salida de Argentina, por compartirme de su tiempo y conocimiento, su ayuda fue invaluable. También agradezco la ayuda brindada a través de su equipo de Smart Farming: Manuela, Magdalena, Tomas quienes fueron amables y me dejaron recuerdos muy especiales.

Al Dr. Juan Manuel Cantet, por su valiosa ayuda durante el congreso, sus contribuciones técnicas para el trabajo en el laboratorio y por esforzarse en ayudarme a alcanzar uno de mis objetivos en Argentina.

Al Médico Veterinario Agustín Ferreyra por permitirme participar en su proyecto durante la estancia en Argentina, por las aventuras y las enseñanzas compartidas, por buscar la forma de ayudarme cada que era necesario, por mostrarme las mil caras de Argentina, por adoptarme, por la confianza y por ser un gran amigo; también a su familia y amigos, personas tan lindas que hicieron el fin de mi estancia amena, me recibieron en su hogares tan cálidamente y escucharon interesados de mi vida, proyecto y experiencias.

A todos los estudiantes que fueron mi compañía en la FIL, me ayudaron a desarrollar mis habilidades de comunicación y me hicieron sentir tranquila en otro país, a todos los que me abrieron su hogar y compartieron de su tiempo, Emilia, Mariano, Belén, Milena, Catalina, Víctor, Florencia, Dara, Mailen, Mari, Mauro y todos y cada uno de los estudiantes que estuvo en la FIL.

A mi director, Dr. Rodolfo Vieyra Alberto, por la confianza, apoyo y paciencia, por todo el tiempo dedicado a mi formación académica, por ser un gran guía y mostrarme aspectos importantes para mejorar, toda su orientación y consejos han sido valiosos no solo en el aspecto académico si no también en la vida cotidiana.

A mi codirector, Dr. Juan Carlos Ángeles Hernández, por su contribución a mi formación y desarrollo de esta investigación, por dedicar su tiempo a enriquecer aspectos más allá del ámbito profesional, su manera de transmitir información cambio mucho mis métodos de aprendizaje, tiene una mente admirable.

A mi asesor, Dr. Alfonso Longinos Muñoz Benítez, por contribuir en todo lo posible a esta investigación, por destinar de su tiempo cada que lo solicité, por sus enseñanzas, ideas, por estar pendiente y ayudarme a reconocer mis logros personales además de los académicos.

A mi asesor, Dr. Oscar Enrique Del Razo Rodríguez, por sus aportaciones y tiempo dedicado, por brindarme siempre información de interés y estar dispuesto para ayudarme a mejorar.

Al rancho “Los Monteros”, especialmente al MVZ Gustavo Márquez por ser mi apoyo dentro para que todo saliera en orden, por su tiempo y conocimiento compartido, a su equipo que brindo su ayuda y a los propietarios por abrirme las puertas.

A mi pareja, Misael, por su apoyo en todos los aspectos, por dedicar parte de su tiempo a este proyecto; a mi hermano que también participó y a los estudiantes y amigos que colaboraron, Marco Antonio, Enriqueta, Samuel, Eduardo, José Luis y algunos más, cada ayuda fue de suma importancia.

A la MVZ Katia Lemus, por sus enseñanzas y contribuir a desarrollar mi autonomía profesional, su tiempo y apoyo también me permitieron crecer como persona, y también, al MVZ Saúl Gutiérrez, que me transmitió sus experiencias y habilidades que me fortalecieron crecer profesionalmente.

II. DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a mi pareja, Misael, por estar conmigo en cada fase, siempre siendo mi soporte emocional y mi mayor alentador.

A mi madre y hermanos porque pese a todo hemos crecido y su apoyo nunca me falta, es un honor pertenecer a mi manada oso.

A mi padre, porque me preparó y apoyó siempre, y continúa conmigo a través de sus recuerdos y enseñanzas.

A mis amigos: Alexis, Nara, Eduardo, Hugo, Marco Eduardo y Enriqueta que sin dudarlos me han apoyado, y me brindan momentos gratos.

A mis fieles compañeros Domminic, Donatello, Myrcella, Jack, Kratos y Chapina. Siempre serán mis motivaciones de vida.

“No pierdas tu corazón hasta que estés donde quieres estar”
- Dream on, Dreamer.

III. RESUMEN

El objetivo fue evaluar el efecto del nivel de inclusión de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas en producción sobre los parámetros de la fermentación ruminal *in vitro*, el rendimiento de leche y su composición química, además del impacto económico en las dietas. Para cumplir con el objetivo, la investigación se dividió en tres fases. En la primera fase se realizó un metaanálisis donde se muestra que los granos húmedos de cervecería fueron el ingrediente con mayor cantidad de ensayos (54 %), seguido por los granos en forma seca (38 %) y los malt sprouts (raicilla) fueron los menos utilizados (8 %). Incluir granos húmedos de cervecería en la alimentación de vacas en producción tiene un efecto positivo sobre la producción de leche (DME = +0.55; P = 0.004) con rendimiento bruto de 0.89 kg d⁻¹ (P = 0.006), sin afectar los componentes mayoritarios de la leche (P>0.05). En la segunda fase se realizó digestibilidad *in vitro* con dietas isoenergéticas e isoproteicas, donde la producción de gas *in vitro* fue mayor (P<0.05) en GHC15 con 273.8 ml g⁻¹ de muestra comparado con GHC30 que obtuvo 254.0 ml g⁻¹ de muestra. Por último, se utilizaron 15 vacas encastadas con Holstein, multíparas, con una edad de 4.32 ± 0.7 años, un peso vivo 481 ± 120 kg, una producción de leche diaria de 23.53 ± 2.58 kg y 158 ± 54 días en lactación y se observó que las vacas en el tratamiento GHC15 produjeron 19 % más leche en comparación con las vacas que estuvieron en el GHC30 (P<0.05). El margen económico total durante el periodo experimental fue de \$149.7 USD y el margen por kilogramo de leche fue de \$0.06 USD para el tratamiento GHC15 comparado con GHC30; así mismo, GHC15 tuvo un mayor margen económico total de \$90.43 USD comparado con GHC0 (P<0.05). En conclusión, el metaanálisis muestra que la inclusión de subproductos de cervecería en la alimentación de vacas lecheras en estabulación mejora la producción de leche sin afectar el contenido de grasa, proteína y lactosa. La inclusión de 15 kg de granos húmedos de cervecería mantuvo los parámetros de fermentación ruminal *in vitro*; sin embargo, la inclusión de 30 kg afecta estos parámetros. En cuanto al ensayo *in vivo*, las vacas mejoraron su comportamiento productivo e incrementaron su rentabilidad con la inclusión de 15.32 kg en base fresca de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas.

IV. ABSTRACT

The aim was to assess the effect of the inclusion level of wet brewer grains in the diet of cows in production on the parameters of ruminal fermentation *in vitro*, milk yield and its chemical composition, as well as the economic impact on diets. To meet the objective, the research was divided into three phases. In the first phase, a meta-analysis was carried out showing that wet brewing grains were the most tested ingredient (54 %), followed by dry grains (38 %) and malt sprouts (raicilla) were the least used (8 %). Inclusion of wet brewer grains in the feed of cows in production has a positive effect on milk production (DMS = +0.55; P = 0.004) with gross yield of 0.89 kg d⁻¹ (P = 0.006), without affecting the majority components of the milk (P>0.05). In the second phase, digestibility was performed *in vitro* with isoenergetic and isoproteic diets, where gas production was higher (P<0.05) *in vitro* at GHC15 with 273.8 ml g⁻¹ sample compared to GHC30 which obtained 254.0 ml g⁻¹ sample. Finally, 15 cows were used, mixed-breed, with an age of 4.32±0.7 years, a live weight of 481±120 kg, a daily milk production of 23.53±2.58 kg and 158±54 days in lactation and cows in the GHC15 treatment were observed to produce 19% more milk than cows in the GHC30 treatment (P<0.05). The total economic margin during the experimental period was \$149.7 USD and the margin per kilogram of milk was \$0.06 USD for the treatment GHC15 compared to GHC30; likewise, GHC15 had a higher total economic margin of \$90.43 USD compared to GHC0 (P<0.05). In conclusion, the meta-analysis shows that the inclusion of brewing by-products in the feed of dairy cows in stabling improves milk production without affecting fat, protein and lactose content. Inclusion of 15 kg of wet brewing grains maintained the parameters of ruminal fermentation *in vitro*; however, inclusion of 30 kg affects these parameters. In the *in vivo* trial, cows improved their productive behavior and increased their profitability with the inclusion of 15.32 kg fresh-based wet brewing grains in the cow diet.

V. ÍNDICE

I. AGRADECIMIENTOS	I
II. DEDICATORIAS	III
III. RESUMEN	IV
IV. ABSTRACT	V
V. ÍNDICE	1
VI. ÍNDICE DE CUADROS	3
VII. ÍNDICE DE FIGURAS	4
I. INTRODUCCIÓN	5
II. ANTECEDENTES	6
2.1 SITUACIÓN ACTUAL DE LA LECHERÍA.....	6
2.2. LA LECHE	6
2.2.1 <i>Características físicas de la leche</i>	7
2.2.2 <i>Composición química de la leche</i>	7
2.3 METABOLISMO DE NUTRIENTES EN LOS RUMIANTES.....	9
2.3.1 <i>Metabolismo de carbohidratos</i>	10
2.3.2 <i>Metabolismo de proteínas</i>	12
2.3.3 <i>Metabolismo de lípidos</i>	13
2.4 SINTESIS DE LA LECHE.....	13
2.4.1 <i>Proteína en leche</i>	15
2.4.2 <i>Lactosa en leche</i>	16
2.4.3 <i>Grasa en leche</i>	17
2.4.4 <i>Ácido Linoleico Conjugado</i>	19
2.6. SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA CERVECERA.....	21
2.6.1 <i>Uso de los granos húmedos de cervecería en la alimentación de vacas lecheras</i>	23
III. JUSTIFICACIÓN	25
IV. HIPOTÉSIS	26
V. OBJETIVOS	27
5.1 OBJETIVO GENERAL.....	27
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	28
6.1 FASE I: REVISIÓN SISTEMÁTICA Y ANALÍTICA.....	28
6.1.1 <i>Búsqueda y criterios de selección</i>	28
6.1.2 <i>Procedimientos estadísticos</i>	30
6.2. FASE II: PARÁMETROS DE FERMENTACIÓN RUMINAL <i>IN VITRO</i>	30
6.2.1 <i>Área de estudio</i>	30

6.2.2 Desarrollo experimental	30
8.2.3 Registro del volumen de gas.....	33
8.2.4 Análisis estadístico	34
8.3. FASE III: RENDIMIENTO PRODUCTIVO EN VACAS.....	34
8.3.1. Área de estudio.....	35
8.3.2. Tamaño de muestra.....	35
8.3.3. Características de los animales	36
8.3.4. Diseño experimental y tratamientos	36
8.3.5. Desarrollo del ensayo	36
8.3.6. Manejo y asignación de praderas	37
8.3.7. Muestreo y registro de datos.....	37
8.3.8. Análisis de laboratorio.....	38
8.3.9. Análisis de costos	39
8.3.10. Análisis estadístico	39
VII. RESULTADOS.....	40
9.1 METAANÁLISIS SOBRE LA INCLUSIÓN DE SUBPRODUCTOS DE CERVECERÍA EN LA DIETA . 40	
9.1.1 Rendimiento y composición química de la leche.....	41
9.2 EFECTO DE LA INCLUSIÓN DE GRANOS HÚMEDOS DE CERVECERÍA SOBRE LOS PARAMETROS DE LA FERMENTACIÓN RUMINAL <i>IN VITRO</i>	43
9.2.1 Parámetros de fermentación.....	43
9.3 EFECTO DE LA INCLUSIÓN DE GRANOS HÚMEDOS DE CERVECERÍA EN LA DIETA DE VACAS HOLSTEIN.....	45
9.3.1 Producción y composición química de la leche	45
9.3.2 Análisis de costos	50
VIII. DISCUSIÓN GENERAL	51
METAANÁLISIS SOBRE LA INCLUSIÓN DE SUBPRODUCTOS DE CERVECERÍA EN LA DIETA.....	51
EFECTO DE LA INCLUSIÓN DE GRANOS HÚMEDOS DE CERVECERÍA SOBRE LOS PARAMETROS DE LA FERMENTACIÓN RUMINAL <i>IN VITRO</i>	52
EFECTO DE LA INCLUSIÓN DE GRANOS HÚMEDOS DE CERVECERÍA EN LA DIETA DE VACAS HOLSTEIN.....	53
XI. CONCLUSIONES.....	56
XII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	57
XIII. ANEXOS	63
RESUMEN PUBLICADO EN LA REVISTA ARGENTINA DE PRODUCCIÓN ANIMAL.....	63
CONSTANCIA DE ESTANCIA EN FUNDACIÓN INSTITUTO DE LA LECHE, ARGENTINA	64
RECONOCIMIENTO EN EL ÁREA DE NUTRICIÓN ANIMAL, POR RESUMEN PRESENTADO EN EL CONGRESO DE LA ASOCIACIÓN ARGENTINA DE PRODUCCIÓN ANIMAL, 2023	65
RESUMEN PUBLICADO EN PLATAFORMA ENGORMIX	69
DIFUSIÓN DE VIDEO EN PERFIL DE AAPA, INSTAGRAM	70

VI. ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición química de la leche en diferentes especies.....	7
Cuadro 2. Descripción y origen de los subproductos de la industria cervecera.....	22
Cuadro 3. Contenido nutrimental de los subproductos de la industria cervecera.....	23
Cuadro 4. Dietas experimentales y composición química calculada.....	31
Cuadro 5. Nombre común, fórmula química y cantidad de reactivos utilizados para las soluciones amortiguadora, macromineral, micromineral y reductora.....	32
Cuadro 6. Estudios, características de los animales, subproducto utilizado, inclusión en la dieta, lavado y diseño experimental incluidos en el metaanálisis.....	40
Cuadro 7. Tamaño del efecto de la inclusión de subproductos de cervecería sobre el rendimiento y composición química de la leche.....	41
Cuadro 8. Parámetros de fermentación ruminal <i>in vitro</i> con la inclusión de distintos niveles de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas lecheras en producción.....	43
Cuadro 9. Efecto de la inclusión de distintos niveles de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas sobre los componentes químicos de la leche.....	46
Cuadro 10. Efecto del día de muestreo sobre la producción de leche y sus componentes químicos de la leche.....	46
Cuadro 11. Efecto de la inclusión de distintos niveles de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas sobre el rendimiento de componentes químicos de la leche.....	48
Cuadro 12. Efecto del día de muestreo sobre el rendimiento de componentes químicos de la leche.....	48
Cuadro 13. Efecto de la inclusión de distintos niveles de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas sobre la ingesta total de materia seca, la ingesta de acuerdo con su peso vivo y eficiencia alimenticia.....	49
Cuadro 14. Efecto del día de muestreo sobre la ingesta total de materia seca, la ingesta de acuerdo con su peso vivo y eficiencia alimenticia.....	49
Cuadro 15. Análisis de costos parciales durante el ensayo.....	50

VII. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Formación de componentes de la leche.....	14
Figura 2. Biohidrogenación de los ácidos grasos oleico, linolénico y linoleico.....	20
Figura 3. Obtención de subproductos de cervecería durante el proceso de elaboración de la cerveza a partir del grano de cebada.	21
Figura 4. Esquema del proceso de búsqueda y filtrado de artículos para el metaanálisis.	29
Figura 5. Representación gráfica del tamaño de muestra.	35
Figura 6. Manejo alimenticio de las vacas en producción en el ensayo.	37
Figura 7. Diagrama de bosque de la producción de leche (kg día^{-1}) en ensayos con la inclusión de subproductos de cervecería en dietas de vacas lecheras.	42
Figura 8. Cinética de fermentación ruminal <i>in vitro</i> con la inclusión de distintos niveles de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas lecheras en producción.....	44
Figura 9. Efecto de la inclusión de distintos niveles de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas sobre la producción de leche.	45
Figura 10. Efecto de la interacción entre el nivel de inclusión de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas y el día muestreo sobre los contenidos de proteína, lactosa y sólidos no grasos de la leche.	47

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente es un desafío satisfacer las necesidades alimentarias de la creciente población considerando que los productos que demanda deben ser de calidad (Hill y Wall, 2017).

La leche es uno de los productos de origen animal más consumidos por la población humana a nivel mundial y nacional. En México, el consumo de leche per cápita se registró de 133.9 litros en el 2023 y es consumido en su en su mayoría por la población infantil y recientemente ha incrementado su consumo en la demás edades, por ello, la producción lechera nacional se encuentra en un constante aumento con una tasa media anual de crecimiento de 2 % desde hace diez años (SIAP, 2024).

Desde hace décadas, se han utilizado subproductos de la industria cervecera en dietas de rumiantes como alternativa para incrementar la producción de leche debido a que benefician el crecimiento corporal y favorecen la lactancia (Mirzaei y Maheri-Sis, 2008). A pesar de que no se conoce con exactitud, el rendimiento lechero y sus componentes podrían estar influenciados por el efecto de la alimentación sobre la fermentación (Miyazawa et al., 2007), un incremento en la producción de gas *in vitro*, podría manifestar un mejor comportamiento productivo en vacas (Van Soest, 1994).

En este mismo sentido, la alimentación con subproductos como los granos húmedos de cervecería podría ser una alternativa económica en dietas de vacas en producción, cuando es de fácil acceso (Mirzaei y Maheri-Sis, 2008), cuyos costos desempeñan un papel importante en la permanencia de la actividad lechera en países en desarrollo (Salinas-Martínez et al., 2020).

Por lo anterior, el objetivo fue evaluar el efecto del nivel de inclusión de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas en producción sobre los parámetros de la fermentación ruminal *in vitro*, el rendimiento de leche y su composición química, además del impacto económico en las dietas.

II. ANTECEDENTES

2.1 SITUACIÓN ACTUAL DE LA LECHERÍA

La demanda de leche fluida y el crecimiento exponencial de la población humana requieren que las unidades de producción lechera sean más eficientes sin afectar a futuras generaciones (Hill y Wall, 2017). En México, la leche es el producto más destacado en el sector pecuario, en el 2023 se registró un consumo per cápita de 133.9 litros. En ese mismo año, la producción de leche fue de 13,333 millones de litros, ocupando el lugar 14 a nivel mundial y siendo Jalisco, Coahuila y Durango los estados con mayor aporte a la producción nacional. Debido a la demanda de leche a nivel nacional, México ha tenido que importar de Estados Unidos, Nueva Zelanda y Uruguay (SIAP, 2024). Por lo que el reto de los actores involucrados en la industria lechera es incrementar la producción láctea, para ello, los nutricionistas juegan un papel de suma importancia.

2.2. LA LECHE

La leche es la secreción natural de la glándula mamaria de los mamíferos sanos, excluyendo el calostro (Fox, 2000). Agudelo y Bedoya (2005) definen a la leche como un producto secretado por la glándula mamaria en estado líquido, de apariencia blanquecina y químicamente compleja. La leche representa un alimento de alto valor nutricional en la dieta para humanos (Goulding et al., 2020), la cual debe ser inocua, sin sustancias químicas, sin color y olor anormales (FAO, 2024).

La producción de leche es dependiente del número de células secretoras mamarias y su actividad metabólica (Ángeles-Hernández et al., 2018). La acción de estas células depende principalmente del manejo alimenticio, tratamientos hormonales y la frecuencia de ordeño, alterando la forma de la curva de lactancia (Stelwagen, 2001). La curva de lactación es la representación gráfica de la producción diaria de leche de una vaca en función del tiempo (Ossa et al., 1997), encontrándose la producción máxima entre la cuarta y octava semana de lactación, seguido de un descenso paulatino (Keown et al., 1986). Comúnmente, el ordeño dura 305 días después del parto para posteriormente preparar la siguiente lactación (Klein, 2020)

2.2.1 Características físicas de la leche

La leche tiene un color blanco-amarillento, el cual es debido a que las partículas de caseína y grasa impiden el paso de la luz. Dentro de la grasa se encuentran carotenos que aportan el color amarillento, que son obtenidos principalmente de los forrajes. La lactosa es la responsable del sabor dulce de la leche mientras que la grasa le otorga un aroma ligero. Su pH es de 6.6 y su densidad de 1.03 g ml⁻¹ (Gasque y Blanco, 2001).

2.2.2 Composición química de la leche

La leche está constituida por aproximadamente 87 % de agua, 4 al 5 % de lactosa, 3 % de proteína, 3 al 4 % de grasa, 0.8 % de minerales y 0.1 % de vitaminas (Pereira, 2014). La fracción lipídica de la leche contiene ácidos grasos (saturados e insaturados [monoinsaturados, AGMI y poliinsaturados, AGPI]) y la fracción proteica está constituida por caseínas, lactoalbúminas, lactoglobulinas, enzimas, etc. (García et al., 2014). La leche y sus productos tienen elementos inorgánicos (calcio, potasio, fósforo, magnesio, sodio, cobre, hierro, zinc, selenio, entre otros) indispensables para el desarrollo normal del consumidor final (Wattiaux, 2015a).

El Cuadro 1 muestra el contenido de los principales componentes de la leche en diferentes especies de mamíferos.

Cuadro 1. Composición química de la leche en diferentes especies.

	Vaca	Bisonte	Cabra	Oveja	Mujer
Sólidos totales, %	12.7	14.6	12.3	19.3	12.2
Lactosa, %	4.8	5.1	4.1	4.8	7.0
Proteína, %	3.4	4.5	2.9	4.5	1.0
Grasa, %	3.7	3.5	4.5	7.4	3.8
Cenizas, %	0.7	0.8	0.8	1.0	0.2

Adaptado de Fox (2000).

Una ración para vacas lecheras, con un aporte adecuado de proteína, energía, minerales y fibra detergente neutro (FDN), se reflejará en un rendimiento aceptable de leche y en su composición química (Vieyra-Alberto et al., 2017). Por el contrario,

un desbalance nutricional trae consigo una eficiencia alimenticia desfavorable (Church et al., 2002) y puede afectar la concentración de los componentes mayoritarios de la leche (Kay et al., 2013).

La energía otorgada en la dieta es un determinante de la cantidad de grasa y proteína que tendrá la leche, por lo que dietas con un aporte energético o de fibra deficiente pueden disminuir la formación de ácidos grasos en el rumen, especialmente el ácido acético, precursor de la grasa láctea. Además, dietas bajas en fibra pueden manifestar valores de proteína en leche inferiores al 3 % (Agudelo y Bedoya, 2005).

En este contexto, la proporción de ácidos grasos acético y butírico en rumen influyen en el aumento del contenido de grasa en leche, mientras que el incremento en la cantidad de leche producida es respuesta a una mayor cantidad de ácido propiónico (Contreras y Noro, 2010), el cual brinda un aporte importante de glucosa utilizado en el proceso de producción.

Wattiaux (2005) menciona que existe un incremento en la producción de leche a medida que aumenta el porcentaje de concentrado en la dieta, lo cual es posible gracias a la fermentación propiónica en el rumen.

La leche también posee componentes funcionales como el ácido linoléico conjugado (CLA, por sus siglas en inglés [conjugated linoleic acid]) y ácido graso vaccénico, los cuales suman a los AGMI y AGPI, que han sido y seguirán siendo objeto de estudio de los nutriólogos (Vieyra-Alberto et al., 2017). Estudios han demostrado que el consumo de biomoléculas funcionales disminuye hasta del 20 % de mortalidad en pacientes con problemas cardiacos que consumen ácidos grasos insaturados (AGI) (Livingstone et al., 2013); así mismo, el consumo de CLA y ácido graso vaccénico disminuye el riesgo de hipertensión (Gholami et al., 2017), diabetes *mellitus* tipo II (Eussen et al., 2016) y la obesidad (Shahmirzadi et al., 2019). Por tanto, el consumo de leche con alto contenido de estos AGI ayuda a las personas a tener una vida más saludable.

El incremento del rendimiento de los componentes funcionales generalmente tiene como consecuencia una disminución del rendimiento lechero. Algunas estrategias de alimentación para incrementar estos componentes incluyen el sistema de alimentación (Dietas totalmente mezcladas versus pastoreo [Morales-Almaráz et al., 2010]) ya que los pastos son una fuente importante de AG, por lo tanto, incrementar el tiempo de pastoreo incrementa la ingesta de AG, sin embargo, es importante aclarar que el pastoreo es acompañado de TMR (total mixed ration); otra estrategia utilizada es la inclusión de lípidos en la dieta, como el aceite de soya, el cual es rico en ácidos grasos insaturados y otorga un mayor sustrato para su producción en glándula mamaria (Vieyra-Alberto *et al.*, 2017), también modificar la relación forraje:concentrado (60:40 vs 40:60 [Angeles-Hernandez et al., 2020]) e incluir semillas de oleaginosas (control vs soya [Plata-Pérez et al., 2022]), entre otras estrategias ha modificado la cantidad de componentes funcionales.

2.3 METABOLISMO DE NUTRIENTES EN LOS RUMIANTES

El aparato digestivo de los rumiantes se encuentra dividido en cuatro compartimentos: retículo, rumen, omaso y abomaso, este último es el glandular y fisiológicamente tendría la función del estómago de los no rumiantes. Los rumiantes se caracterizan por la capacidad de obtener nutrientes de los pastos o forrajes, principalmente hidratos de carbono para aporte energético. Esto es gracias a la digestión fermentativa llevada a cabo por microorganismos anaerobios alojados en el retículo y el rumen (Relling y Matioli, 2003).

El tamaño del rumen es dependiente de la edad y puede verse modificado por la dieta. De manera histológica, el rumen está cubierto de epitelio queratinizado estratificado, no posee glándulas, contiene papilas cuyo tamaño y cantidad difieren en cada saco del rumen y su desarrollo depende del tipo de alimentación. Las papilas pueden medir hasta 1.5 cm de largo y están formadas por tejido conectivo vascularizado, integrado por finas fibras de colágeno y fibras elásticas (Contreras y Noro, 2010).

El proceso digestivo involucra el tiempo de la degradación o hidrólisis de los componentes complejos de la alimentación a moléculas que puedan ser absorbidas por el animal en la medida que la ingesta recorre el tracto digestivo (Mertens, 2005).

En el metabolismo de los alimentos participan bacterias, hongos y protozoarios produciendo enzimas que ayudan a la degradación y que permiten la absorción de nutrientes por las mucosas de las papilas en rumen. Las bacterias se encuentran agrupadas por celulolíticas cuyas enzimas son celulasas y degradan paredes celulares; proteolíticas, que producen proteasas para digerir proteínas; amilolíticas que degradan carbohidratos, almidones y azúcares a través de amilasas; lácticas que utilizan ácido láctico para convertir en propionato; arqueas metanogénicas que forman metano; y lipolíticas encargadas de la degradación de lípidos por medio de lipasas (Tamayo, 2007).

La dieta tiene influencia en la variación del nivel de ácidos grasos producidos en rumen, dentro de los cuales se encuentran el ácido acético y butírico, precursores de la grasa en leche, así como el ácido propiónico, precursor de glucosa que forma parte de la lactosa, principal determinante del volumen de leche (Membrive, 2016). La actividad microbiana en rumen cuya responsabilidad es la digestión y, a su vez, la producción de los distintos ácidos grasos volátiles (AGV), depende de la adaptación de los microorganismos al tipo de alimento consumido (Zavaleta de Lucio, 1976). Se estima que el periodo de adaptación de la mucosa ruminal a un alimento distinto es de 3 a 8 semanas, este proceso incluye la modificación del número, tamaño y distribución de las papilas y también se encuentra mediado por la producción de AGV; el incremento de ácido propiónico y butírico demanda un suministro de sangre mayor para su absorción y esto puede desencadenar agentes tróficos y hormonales que promueven el desarrollo (Membrive, 2016).

2.3.1 Metabolismo de carbohidratos

Los carbohidratos representan el mayor suministro de energía al organismo del rumiante y, por lo tanto, también son los principales precursores para la síntesis de lactosa (Wattiaux y Armentano, 2015). En general, los carbohidratos de la dieta (celulosa, hemicelulosa, pectina, almidón y azúcares solubles) son los principales

sustratos de fermentación y son degradados a pentosas y hexosas antes de ser fermentados a AGV (France y Dijkstra, 2005).

El consumo de carbohidratos no-fibrosos, además de generar mayor cantidad de AGV en rumen estimula la producción de ácido propiónico mientras que los carbohidratos fibrosos promueven la producción de ácido acético (Wattiaux y Armentano, 2015).

Las bacterias amilolíticas son las encargadas de degradar los carbohidratos. Relling y Matioli (2003) describen este proceso de la siguiente forma:

- Adhesión de los microorganismos a la superficie de los trozos de fibra vegetal (con exposición de la pared celular como consecuencia de la masticación y la rumia).
- Liberación de celulasas al medio ruminal por los microorganismos, las cuales participan en la digestión extracelular de la celulosa generando entre sus residuos celobiosa.
- Captación de la celobiosa por la bacteria y, por acción enzimática de la celobiasa, se obtienen dos moléculas de glucosa.
- Ingreso de glucosa al organismo de la bacteria para generar energía.

El ambiente ruminal tiene condiciones anaerobias, debido a esto los microorganismos utilizan la vía glucolítica para la obtención de energía, produciendo AGV (Membrive, 2016), los cuales son absorbidos a través de la pared del rumen. El acetato y propionato son transportados al hígado en mayor cantidad y el butirato es convertido en su mayoría a β -hidroxibutirato a través de la pared de rumen (Wattiaux y Armentano, 2015). La velocidad de absorción aumenta con el largo de la cadena de carbonos (acético, C2; propiónico, C3; y, butírico, C4), razón por la cual el orden observado es butírico>propiónico>acético (Contreras y Noro, 2010). El pH ruminal también puede modificar la absorción de los AGV, disminuyendo conforme el medio se alcaliniza y aumentando la absorción si el medio se acidifica. El ácido propiónico interviene en la gluconeogénesis y en la síntesis de grasas participando en forma de glucosa; el ácido butírico que escapa del metabolismo

ruminal es utilizado en hígado, junto con ácidos grasos de cadena más larga que fueron generados en rumen para la síntesis de grasas más complejas, y el ácido β -hidroxibutirato es utilizado para obtener energía y, en conjunto con el acetato, se utiliza como precursor de ácidos grasos de cadena corta (Zavaleta de Lucio, 1976). Para la producción de leche de calidad nutritiva es necesario un equilibrio entre el aporte de nutrimentos de la dieta, el rumen, el hígado y la glándula mamaria (Tamayo, 2007).

2.3.2 Metabolismo de proteínas

Las proteínas contenidas en los alimentos de rumiantes son degradadas por los microorganismos del rumen para obtener aminoácidos, amoníaco y ácidos orgánicos. Otras fuentes de obtención de amoníaco son las fuentes de nitrógeno no-proteico y la urea contenida en saliva. De las proteínas incluidas en los forrajes y concentrados, se degradan entre 60-80 % y 30-60 % respectivamente (Relling y Matioli, 2003). Las proteínas que se incluyen en la dieta se dividen en proteína degradable en el rumen (PDR) y en no degradable en rumen (PNDR), compuestas por nitrógeno no proteico y proteína verdadera (Contreras y Noro, 2010).

Las bacterias proteolíticas utilizan los aminoácidos, péptidos, proteínas y nitrógeno no proteico como fuente de energía y liberan amoníaco (NH_3) como producto de desecho, mientras que las celulolíticas utilizan el NH_3 y glucosa para la proliferación de bacterias que llegarán a abomaso e intestino delgado, donde hay un desdoblamiento de la proteína microbiana y los aminoácidos liberados llegan por vía sanguínea a hígado y a otros tejidos, entre ellos a la glándula mamaria (Tamayo, 2007).

Los rumiantes también pueden sintetizar aminoácidos para la formación de proteínas a partir de fuentes de nitrógeno no-proteico por acción de los microorganismos en rumen. El proceso de síntesis de proteína microbiana en rumen depende de la disponibilidad de amoníaco, el cuál es dependiente de la energía generada por la fermentación de carbohidratos (Wattiaux, 2015b). Gran parte de la

proteína que se suministra al intestino delgado es de origen microbiano (Pulido, 2010).

2.3.3 Metabolismo de lípidos

Los lípidos en las dietas de vacas lecheras tienen relevancia, debido a que su metabolismo contribuye directamente a alrededor de la mitad de la grasa contenida en la leche, además de ser una de las fuentes más altas de energía (Wattiaux y Grummer, 2015). De manera general, la estructura de un triglicérido se forma por una unidad de glicerol y tres ácidos grasos, en gramíneas y leguminosas abundan glicolípidos cuya estructura es similar, pero un ácido graso es remplazado por un azúcar (galactosa) o bien, un fosfato. El grado de saturación influye en la digestión del rumiante, pudiendo interferir con la fermentación de carbohidratos, las plantas en su mayoría contienen ácidos grasos insaturados (Wattiaux y Grummer, 2015).

Las bacterias lipolíticas realizan el metabolismo de los lípidos rompiendo el enlace entre el glicerol y los ácidos grasos, los cuales quedan libres en rumen para pasar por el proceso de biohidrogenación con el fin de reducir los dobles enlaces, estas bacterias también producen ácidos grasos volátiles y CO₂ (Tamayo, 2007).

2.4 SINTESIS DE LA LECHE

La producción de leche por la glándula mamaria se puede dividir en los siguientes procesos: síntesis de la leche, secreción de los componentes lácteos en el alveolo glandular, descenso de la leche por los conductos a las cisternas y la eyección de la leche (Pardini, 2012).

El alveolo es la unidad funcional en glándula mamaria, la agrupación de 10 a 100 alveolos forma un lóbulo, los cuales se organizan en unidades más grandes dentro de un conducto colector (Wattiaux, 2015c). La glándula mamaria posee alvéolos como parte de su tejido excretor y posee solo una capa de células epiteliales, quienes sintetizan leche utilizando como energía ATP proveniente de la glucosa y acetato, quienes ingresan a la glándula mamaria por vía sanguínea (Tamayo, 2007).

La leche es sintetizada en los alveolos y almacenada en los conductos excretores y seno galactóforo hasta el momento de la ordeña. Se distribuye en dos niveles, primero en las cisternas y después en la región alveolar. En vacas altas productoras el tejido es muy elástico, cada cuarto puede tener la capacidad de almacenar hasta 10 litros de leche (Angulo y Olivera, 2007).

Los bovinos necesitan que la dieta cubra sus requerimientos nutricionales ya que los nutrientes contenidos en ella serán absorbidos a nivel digestivo y aportarán nutrientes a glándula mamaria para la producción de leche (Tamayo, 2007).

La Figura 1 muestra un esquema de los principales componentes de la leche y precursores de estos.

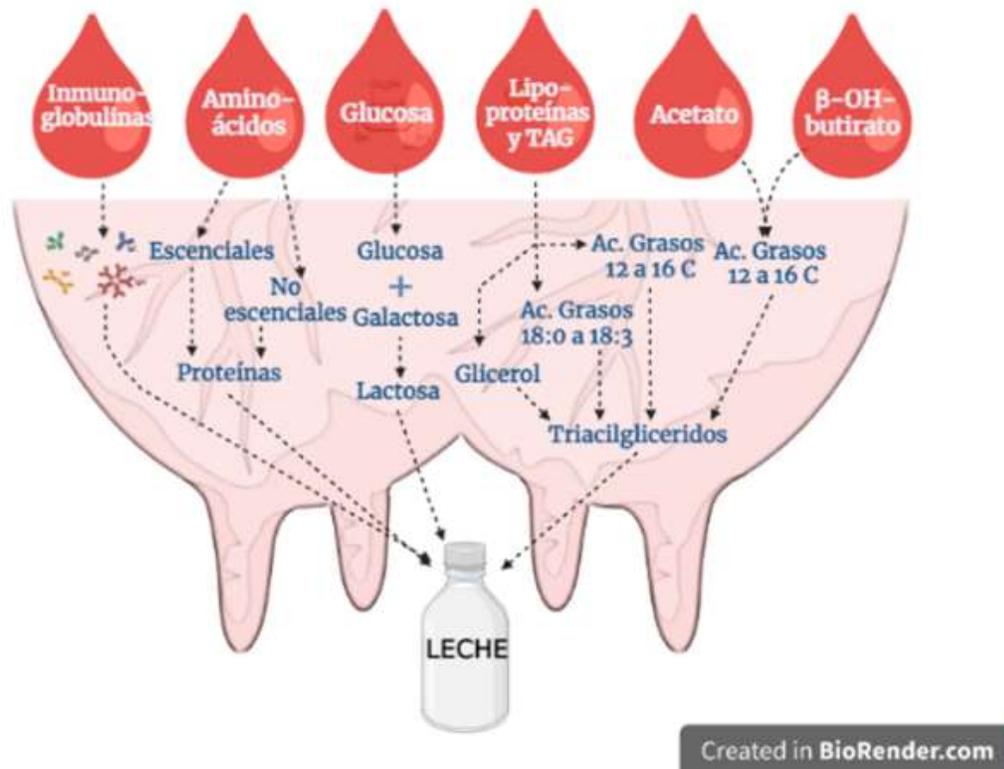


Figura 1. Formación de componentes de la leche.

Pendini (2012) refiere cinco vías para la secreción de los componentes de la leche provenientes de la célula epitelial del alveolo, cuatro de ellas son de tipo transcelular y una paracelular. De acuerdo con la estructura química de la molécula se seleccionará la vía para que atraviese la célula epitelial productora:

- Ruta I: el mecanismo básico es la exocitosis, lo emplean las proteínas, la lactosa, el calcio, el fosfato y el citrato en el aparato de Golgi, las moléculas son envueltas en vesículas que al madurar se acercan a la porción apical de las células para posteriormente liberarse a la luz alveolar.
- Ruta II: es utilizada por la fracción lipídica, los glóbulos de grasa son la aglomeración de pequeñas gotas de grasa que posteriormente son liberados a la luz alveolar.
- Ruta III: permite el paso de agua y de iones monovalentes, el agua es atraída por un gradiente osmótico, principalmente lactosa y minerales.
- Ruta IV: por esta vía cruzan las inmunoglobulinas, requiere de la formación del complejo receptor-inmunoglobulina, para ser liberado a la luz alveolar.
- Ruta V: es dependiente de las hormonas del complejo galactopoyético como establecimiento y mantenimiento de la lactancia, así existe un paso de los componentes del plasma y la sangre que forman parte de la leche.

2.4.1 Proteína en leche

Durante la lactancia, la glándula mamaria incrementa la absorción de aminoácidos, los cuales pueden ser convertidos a otros aminoácidos para utilizarse directamente o sintetizarse en proteínas, o bien, pueden ser oxidados para obtención de energía (Wattiaux, 2015b).

La síntesis de proteínas es efectuada en el retículo sarcoplásmico rugoso, utilizando los aminoácidos y péptidos que llegan vía sanguínea a glándula mamaria, posteriormente las proteínas son recibidas en el aparato de Golgi y liberadas por exocitosis del alveolo mamario (Relling y Matioli, 2003).

La calidad nutricional de una proteína determinara su biodisponibilidad y utilización en el organismo (Fox, 2000). La cantidad de aminoácidos que son tomados de vía sanguínea es mayor que los que llegan a la leche debido a que algunos son degradados para generar energía. Los aminoácidos ingresan a las células secretoras mediante un mecanismo en el que interviene la glutamiltranspeptidasa. Una vez dentro del citoplasma, estos aminoácidos son transportados hacia los

ribosomas del retículo endoplásmico rugoso por el ARN de transferencia, el cual se guía por el ARN mensajero transcrito a partir del ADN nuclear. Tras la formación de la cadena polipeptídica, esta se traslada a las vesículas del aparato de Golgi, al igual que la lactosa y los minerales. En este proceso, las cadenas polipeptídicas se estructuran en niveles secundarios, terciarios y cuaternarios, adquiriendo su forma final como proteínas funcionales (Pendini, 2012).

La caseína, la β -lactoglobulina y la α -lactoalbúmina representan un 95 % de la proteína de la leche; las tres son sintetizadas en la ubre usando péptidos, proteínas y aminoácidos libres. Las proteínas como seroalbúmina, inmunoglobulinas y caseína son tomadas directamente de sangre por la glándula (Tamayo, 2007).

2.4.2 Lactosa en leche

La lactosa es sintetizada en los lactocitos de la glándula mamaria y la cantidad sintetizada determina el volumen de leche ya que es el principal responsable del arrastre osmótico de agua (Wattiaux, 2015c).

La lactosa es un disacárido que se compone de glucosa y galactosa, la glucosa llega vía sanguínea a la glándula y se utiliza alrededor del 70 % (Relling y Matioli, 2003). Por gluconeogénesis, el hígado sintetiza el 60 % de la glucosa que circula en sangre, la cual es generada a partir del ácido propiónico. Cuando la energía no es suficiente, la glucosa es producida con las reservas corporales, su captación en las células secretoras es regulada por hormonas como insulina, somatotropina, prolactina, entre otras, que, al llegar a los receptores de la célula, los estimulan permitiendo así el paso de la glucosa al interior para su síntesis en el aparato de Golgi. El proceso se realiza con una molécula de glucosa y una de galactosa, en la etapa final interviene la enzima lactosa-sintetasa, esta enzima se forma por la galactosil-transferasa, componente de α -lactoalbumina y permanece en la membrana y lumen del aparato de Golgi. Esta es una de las razones por las cuales la α -lactoalbumina influye en la producción de glucosa y, a su vez, su síntesis se da por medio de aminoácidos obtenidos de las proteínas de la dieta (Tamayo, 2007)

La lactosa mantiene el equilibrio osmótico dentro de la vesícula de Golgi junto con minerales como Cl, K, S y Ca, esta vesícula se acerca a la membrana apical de la célula y, cuando entra en contacto con el lumen del alveolo, establece una unión que permite que la vesícula libere su contenido al lumen. Las vesículas poseen una cierta relación de lactosa con los iones, por lo cual su producción es constante, situación que indica que la cantidad de leche producida es proporcional a la síntesis de la cantidad de lactosa (Pendini, 2012).

2.4.3 Grasa en leche

La leche de vaca contiene alrededor del 3.5 % de grasa, su variación depende del tipo racial, del tercio de lactación, de la condición corporal del animal y mayoritariamente de la dieta (Wattiaux, 2015a). El contenido de grasa disminuye paulatinamente las primeras 4-6 semanas posteriores al parto para después aumentar y/o mantenerse estable el resto de la lactación. Posterior al pico de lactancia, la cantidad de litros producidos se ve disminuida antes que la síntesis de grasa, razón por la cual aumenta su concentración en la lactancia (Relling y Matioli, 2003).

La grasa está presente en emulsión en la leche, en forma globular con diámetros de 1.5 a 10 micrones, generalmente agrupados en racimos. Los glóbulos grasos están rodeados por una membrana que brinda estabilidad y protección. La grasa se compone de triglicéridos (98 %), fosfolípidos (cefalina y lecitina; <1 %), prótidos, enzimas, vitaminas (A, D, E y K) y ácidos grasos libres (Pendini, 2012). La leche también contiene carotenoides en cantidades mínimas que contribuyen en un 10-50 % a la actividad de la vitamina A en la leche y son responsables del color amarillo de la grasa láctea e indirectamente también en el color de la leche (Fox, 2000).

Las vacas sintetizan la grasa de la leche utilizando los precursores que se derivan de hidratos de carbono otorgados en la dieta (Fox, 2000) y de los procesos catabólicos del organismo. De tal manera que un aporte energético deficiente o de fibra puede reducir la formación de ácidos grasos en el rumen, principalmente el ácido acético, precursor de la grasa láctea. El aporte de energía también influye en la cantidad de proteína ya que se ha observado que dietas bajas en energía pueden

tener valores de 3 % o menos (Agudelo y Bedoya, 2005). Niveles elevados de grasa en la dieta (>6 % sobre la materia seca) también pueden provocar un descenso de la grasa en la leche (Vieyra-Alberto et al., 2017).

El ácido propiónico que llega al hígado es transformado en glucosa, de la cual una fracción se convierte en glicerol, un compuesto que se utiliza en la síntesis de grasa para la leche. Por su parte, acetato y β -hidroxibutírate son utilizados para la formación de ácidos grasos que se encuentran en la grasa de la leche (Wattiaux y Armentano, 2015)

La grasa se sintetiza en retículo sarcoplásmico liso y se almacena en forma de glóbulos rodeados de una membrana para ser liberados del alveolo. El origen y tipo de ácido graso secretado será diferente de acuerdo con el tiempo de lactancia. Los ácidos grasos de hasta 16 carbonos de la leche pueden provenir de la síntesis de ácidos grasos en glándula mamaria a partir de acetato y del β -hidroxibutírate proveniente del tracto digestivo. Mientras, los ácidos grasos mayores a 18 carbonos pueden ser captados de la circulación y pueden provenir de la absorción intestinal o de la movilización de grasa corporal, esta última tiene mayor relevancia en las primeras 6 a 8 semanas de lactancia debido al balance energético negativo (Relling y Matioli, 2003).

En el caso de síntesis *de novo*, los precursores son los ácidos grasos volátiles y el alargamiento de la cadena se realiza adicionando grupos de dos átomos de carbono, los cuales provienen del ácido acético y del ácido β -hidroxibutírico, hasta combinarse 10 átomos de carbono. Si el precursor es el ácido acético, entonces se obtienen ácidos grasos saturados con átomos de carbono en número par. Por otra parte, los ácidos grasos formados en el intestino son transportados vía sanguínea en forma de quilomicrones (LVLDL) y lipoproteínas de baja densidad (LDL), los cuales pasan vía linfática y regresan a torrente sanguíneo. Los triglicéridos que llegan a glándula mamaria, debido a su tamaño, requieren la acción de la enzima lipoproteína lipasa (producida en los lactocitos) para pasar al interior; es así como se separa por hidrólisis el glicerol de los ácidos grasos. Estos ácidos grasos son

esterificados dentro de aparato de Golgi, es decir, reciben nuevamente un grupo glicerol para conformar los triglicéridos de la leche (Pendini, 2012).

La grasa de la leche contiene niveles bajos de AGPI, los cuales, en su mayoría, son obtenidos de los lípidos de la dieta y/o como intermediarios de su hidrogenación en el rumen por los microorganismos (Fox, 2000). Algunos ácidos grasos, intermediarios de la biohidrogenación, han mostrado efecto benéfico al consumidor, tal es el caso del ácido graso vaccénico y la mezcla posicional y geométrica del ácido linoleico conjugado (Relling y Matioli, 2003).

Entre los principales componentes de la leche, la concentración de grasa puede verse afectada por diversos factores, como una reducción en las enzimas precursoras de la fermentación acética, así como una menor disponibilidad de β -hidroxibutírate y enzimas lipogénicas necesarias para la función de la glándula mamaria. De manera similar, la concentración de proteína láctea disminuye cuando el suministro de almidón es insuficiente, ya que esto afecta la síntesis de proteína microbiana, lo que a su vez reduce la síntesis y absorción de aminoácidos a nivel duodenal, indispensables para la formación de proteínas en la leche (Plata-Pérez et al., 2022).

2.4.4 Ácido Linoleico Conjugado

Este término hace referencia a una serie de isómeros posicionales y geométricos del ácido octadecadienoico (C18:2 cis-9 cis-12) con dobles enlaces conjugados, existiendo diferentes isómeros cuya diferencia se encuentra en las posiciones de los pares de dobles enlaces (Bauman et al., 1999).

El isómero de CLA que predomina en la grasa de la leche es cis-9, trans-11 y tiene una proporción de 80-90 % del CLA total (Bauman et al., 1999) y está íntimamente relacionado con la biohidrogenación de los AGPI de la dieta (Bauman et al., 2006).

La biohidrogenación es un proceso natural del rumen donde intervienen enzimas de los microorganismos que se encuentran en él. Los microorganismos transforman los AGI de la dieta en saturados. Como resultado, la mayor parte de los ácidos oleico, linoleico y α -linolénico que ingresan por medio de la dieta terminan formando

2.6. SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA CERVECERA

La producción de cerveza implica una serie de etapas que generan distintos subproductos, cada uno con características nutricionales particulares. La mayoría de estos subproductos tienen un alto contenido de humedad limita significativamente su vida útil (Westendorf y Wohlt, 2002).

Durante la producción de cerveza se obtienen distintos subproductos utilizados en la alimentación de rumiantes, como se muestra en la Figura 3. El proceso de elaboración comprende principalmente cuatro fases: malteado de la cebada, obtención del mosto, fermentación acondicionamiento y envasado.

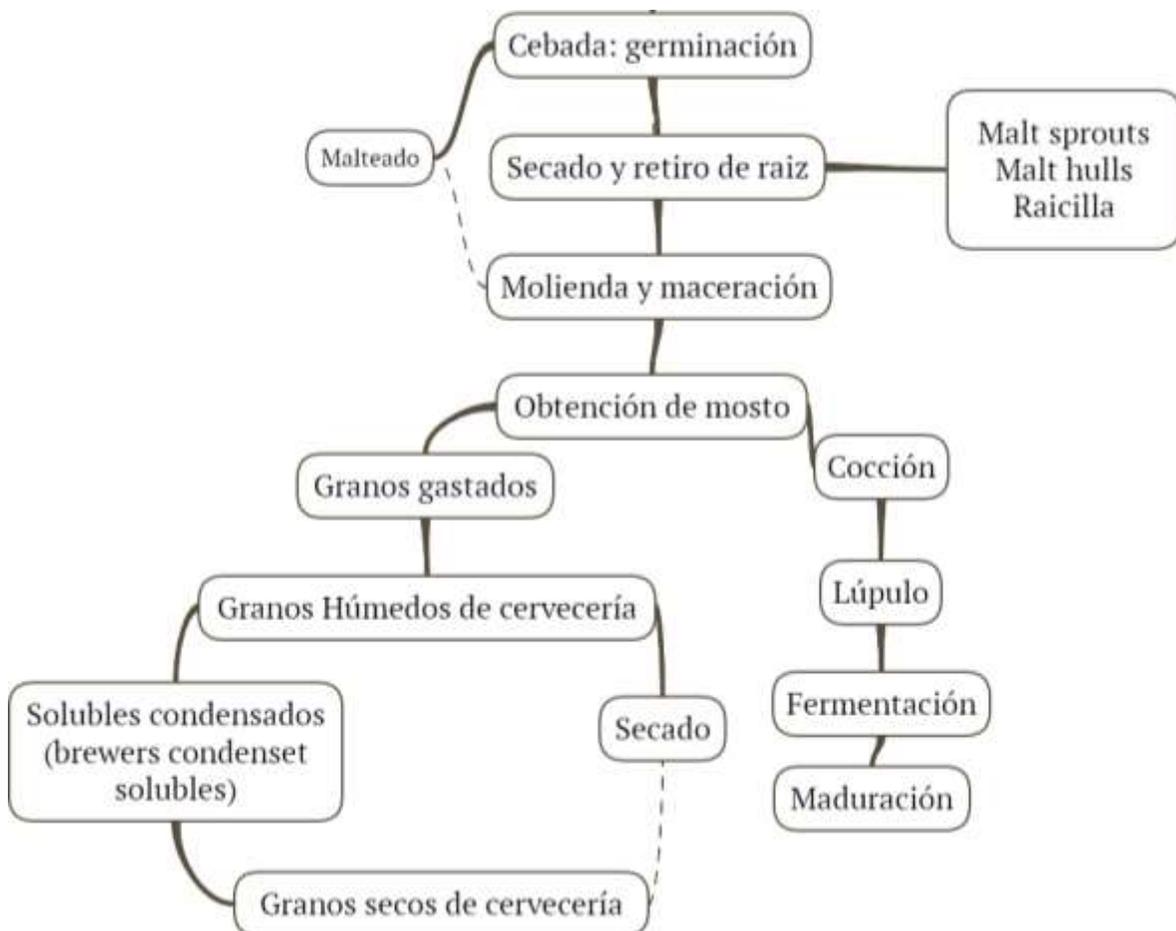


Figura 3. Obtención de subproductos de cervecería durante el proceso de elaboración de la cerveza a partir del grano de cebada.

La imagen anterior fue adaptado de Westendorf y Wohlt, 2002.

Los subproductos pueden comercializarse directamente como granos húmedos de cervecería (GHC) o como granos secos de cervecería (GSC) (Dhiman et al., 2003) y, en algunas regiones, como en el Valle de Tulancingo, se comercializa el malt sprouts (raicilla) y la levadura. En cualquier caso, su uso puede ser una alternativa para reducir costos en la alimentación del ganado (Imaizumi et al., 2015). De acuerdo con su origen, se nombran los subproductos de cervecería como se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Descripción y origen de los subproductos de la industria cervecera.

Concepto	Descripción	Origen
Granos húmedos de cervecería	Residuos de malta sola o mezclada con alta humedad	Resultado del filtrado de fabricación del mosto.
Granos secos de cervecería	Residuos de la malta sola o mezclada seca	Resultado del filtrado de fabricación del mosto, pasando por un proceso de secado.
Raicilla (Malt sprouts)	Brotos de malta	Eliminación de raicillas obtenidas en el proceso de malteado.
Levadura de cerveza		Resultado posterior a que los azúcares cerveceros se hayan convertido en alcohol.

Adaptado de AAFCO (2023) y NASEM (2021).

La humedad es crítica en la calidad y estabilidad de cualquier alimento utilizado en la producción animal porque podría verse afectado su almacenamiento, ya que el tipo de proteína y polisacáridos que posee permite fácil crecimiento de bacterias y, consecuentemente, una corta vida de anaquel. Una elevada cantidad de humedad es una limitante para su uso, especialmente en lugares con altas temperaturas, debido a que un incorrecto almacenaje puede provocar la pérdida de nutrientes y estimular la producción de micotoxinas (Imaizumi et al., 2015). Por el contrario, los alimentos secos son menos complicados de almacenar pero esto implica costos extras si es posterior a su adquisición (Dhiman et al., 2003).

Entonces, de acuerdo con su origen, los subproductos de cervecería presentan contenidos nutrimentales distintos, como se muestra en la Figura 3. Cabe señalar

que todos estos subproductos aportan una concentración importante de nutrientes que pueden ser aprovechados por los rumiantes.

Cuadro 3. Contenido nutricional de los subproductos de la industria cervecera.

Residuo	Granos húmedos de cervecería	Raicilla (Malt sprouts)	Levadura de cerveza	Granos secos de cervecería
Materia seca, %	22.50	81.20	13.40	93.10
Proteína cruda, % MS	28.10	23.90	43.30	25.30
FDN, % MS	49.30	40.50	11.50	51.80
FDA, % MS	23.80	18.30	5.60	24.70
Grasa cruda, % MS	9.52	2.73	3.34	9.02
PNDR, % MS	37	24	63	52
Metionina, % PC	2.14	1.48	0.34	2.14
Lisina, % PC	3.55	4.71	0.65	3.55
Ácidos grasos, % MS	7.61	1.46	2.34	8.31
AG. Linoleico, g 100 g⁻¹	53.82	55.93		48.87
AG. Linolénico, g 100 g⁻¹	5.37	4.34		4.57
AG. Oleico, g 100 g⁻¹	11.23	13.54		14.60

MS = materia seca; FDN = fibra detergente neutra; FDA = fibra detergente ácido; PNDR = proteína no degradable en rumen; PC = proteína cruda; AG = ácido graso.

2.6.1 Uso de los granos húmedos de cervecería en la alimentación de vacas lecheras

El uso de GHC en dietas de vacas lecheras es justificado por el aporte que tiene de proteína no degradable en rumen (Belibasakis y Tsirgogianni, 1996) y el aporte de aminoácidos que pueden aportar a la dieta, destacando metionina y lisina (Imaizumi et al., 2015).

Los granos húmedos de cervecería pueden remplazar a la pasta de soya como fuente proteica en la dieta de vacas lecheras altas productoras. En un estudio, se observó un aumento hasta del 15.7 % en el contenido de grasa, sin afectar el pH ruminal, con la inclusión de 50 % de GHC en el concentrado, en base seca (BS) (Murdock et al., 1981). En otro estudio, se observó un incremento del 0.95 % en el rendimiento de leche con la inclusión de 20 % de GHC en la dieta, también en BS (Imaizumi et al., 2015). Además, otro estudio demostró un incremento de 0.66 kg de

leche al día con la inclusión de 10 % de GHC, en BS, sin modificar el rendimiento de grasa, proteína y lactosa (Chiou et al., 1998) y 2.95 kg de leche al día con la sustitución de diferentes niveles de pasta de soya, aunque con un efecto negativo de 0.29 % en la grasa (Polan et al., 1985).

Por otro lado, otro estudio en el que se incluyeron GHC en un 30 y 40 % en la dieta en BS, no se observó efecto sobre el rendimiento lechero ni en el contenido de grasa láctea, pero si una disminución del contenido de proteína en la leche y el consumo de materia seca (Davis et al., 1983; West et al., 1994). Comparativamente en otro estudio, la inclusión del GHC vs semilla de algodón en la dieta de vacas no produjo diferencias en el rendimiento de leche ni en el contenido de grasa, proteína y lactosa (Firkins et al., 2002).

Por otra parte, Imaizumi et al. (2015) no reportaron cambios en el consumo de materia seca y mostraron un incremento lineal en la producción de leche a medida que incrementó la inclusión de GHC, el contenido de proteína no cambio, pero si el rendimiento lechero; los demás componentes como lactosa, sólidos totales no tuvieron efecto por el GHC. Es importante destacar que la producción incrementó 4.4 % cuando el porcentaje de inclusión de los granos húmedos fue de 20 %.

Murdock et al. (1981) no mostraron diferencias en la composición y producción láctea con la inclusión de GHC en la dieta de vacas, entonces puede ser una alternativa de proteína que sustituya a la pasta de soya. Esto coincide con Chiou et al. (1998) que al comparar dietas con la inclusión del 10 % de GHC con una dieta testigo no mostraron diferencias en la producción de leche y en su composición.

A pesar de los cambios productivos positivos que existen cuando los GHC forman parte de la dieta de vacas en producción, son pocos los estudios que han analizado el impacto económico de esta inclusión. Las dietas con este ingrediente vuelven más redituable un sistema lechero y el retorno económico es mayor conforme incrementa su porcentaje de inclusión (West et al., 1994).

III. JUSTIFICACIÓN

La leche es uno de los productos de origen animal más consumidos por la población humana a nivel nacional y mundial, su alta ingesta se debe al aporte importante de nutrientes esenciales necesarios para el buen funcionamiento del organismo. Para satisfacer esta demanda, las unidades de producción lechera han optimizado los mecanismos de producción para hacerlos más eficientes. El incremento del rendimiento lechero en vacas ha tenido como consecuencia la disminución en los componentes mayoritarios como la proteína y la grasa láctea.

Los subproductos obtenidos de la agroindustria han tenido un auge importante en la alimentación de vacas lecheras ya que, en su mayoría, no compiten con insumos alimenticios utilizados en la dieta del humano. En el Valle de Tulancingo, los residuos de cervecería son de fácil acceso, con costos accesibles para su uso como ingredientes de la dieta de vacas en unidades de producción lechera. Además, los granos húmedos de cervecería contienen nutrientes de alta digestibilidad, como proteína y grasa, los cuales pueden provocar cambios positivos en la composición de la leche, sin cambios importantes en la fermentación ruminal y sin incrementar el costo de la dieta.

IV. HIPOTÉISIS

La inclusión de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas en lactación mejora la producción de leche y el ingreso económico, sin cambios en el contenido de grasa, proteína, lactosa y sólidos no grasos en la leche, ni en los parámetros de la fermentación ruminal *in vitro*.

V. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del nivel de inclusión de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas en producción sobre los parámetros de la fermentación ruminal *in vitro*, el rendimiento de leche y su composición química, además del impacto económico en las dietas.

5.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la inclusión de subproductos de cervecería sobre el comportamiento productivo de vacas lecheras, a través de una revisión sistemática y analítica.
- Evaluar los parámetros de fermentación ruminal *in vitro* con distintos niveles de inclusión de los granos húmedos de cervecería en dietas de vacas en producción.
- Evaluar el efecto de la inclusión de los granos húmedos de cervecería sobre el rendimiento productivo y la composición química de la leche.
- Evaluar la viabilidad económica de las dietas de vacas en producción con la inclusión de granos húmedos de cervecería a través de un análisis de presupuestos parciales.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Fase I: Revisión sistemática y analítica

6.1.1 Búsqueda y criterios de selección

Se realizó una búsqueda de artículos científicos de investigaciones en las que se evaluó el efecto de subproductos de cervecería sobre el rendimiento y composición química de leche de vacas en producción. Para ello, se utilizaron los buscadores de Google académico, PubMed, Science Direct, Web of Science y Primo-UAEH. Las palabras clave utilizadas fueron: “brewers grains wet”, “beef steers cattle”, “dairy cow”, “milk yield” y “growth live weight”. Un requisito para considerar los artículos es que estuvieran publicados en el idioma inglés. Las referencias de los artículos encontrados en la primera búsqueda se revisaron y se anexaron a la base general aquellas relacionadas con el tema.

Los criterios utilizados para la inclusión de los artículos fueron: 1) estar publicados en una revista de impacto internacional; 2) incluir un grupo testigo y al menos otro grupo con la inclusión de algún subproducto de cervecería; 3) presentar un diseño experimental y reportar el tamaño de muestra de cada grupo, así como la desviación estándar, el error estándar o el coeficiente de variación.

La Figura 4 muestra el proceso de búsqueda y la depuración del número de artículos de acuerdo con los criterios de inclusión y exclusión hasta llegar un total de 12 artículos, con los cuales se obtuvo un total de 27 ensayos para el metaanálisis. Se generó una base de datos en Excel® de Office®. Las variables que se analizaron fueron: rendimiento de leche (kg d^{-1}), contenido en leche de grasa ($\text{g } 100\text{g}^{-1}$), proteína ($\text{g } 100\text{g}^{-1}$), lactosa ($\text{g } 100\text{g}^{-1}$) y sólidos no grasos ($\text{g } 100\text{g}^{-1}$), así como el consumo de materia seca (kg d^{-1}). Finalmente, la base de datos fue revisada y validada por dos expertos en el tema.

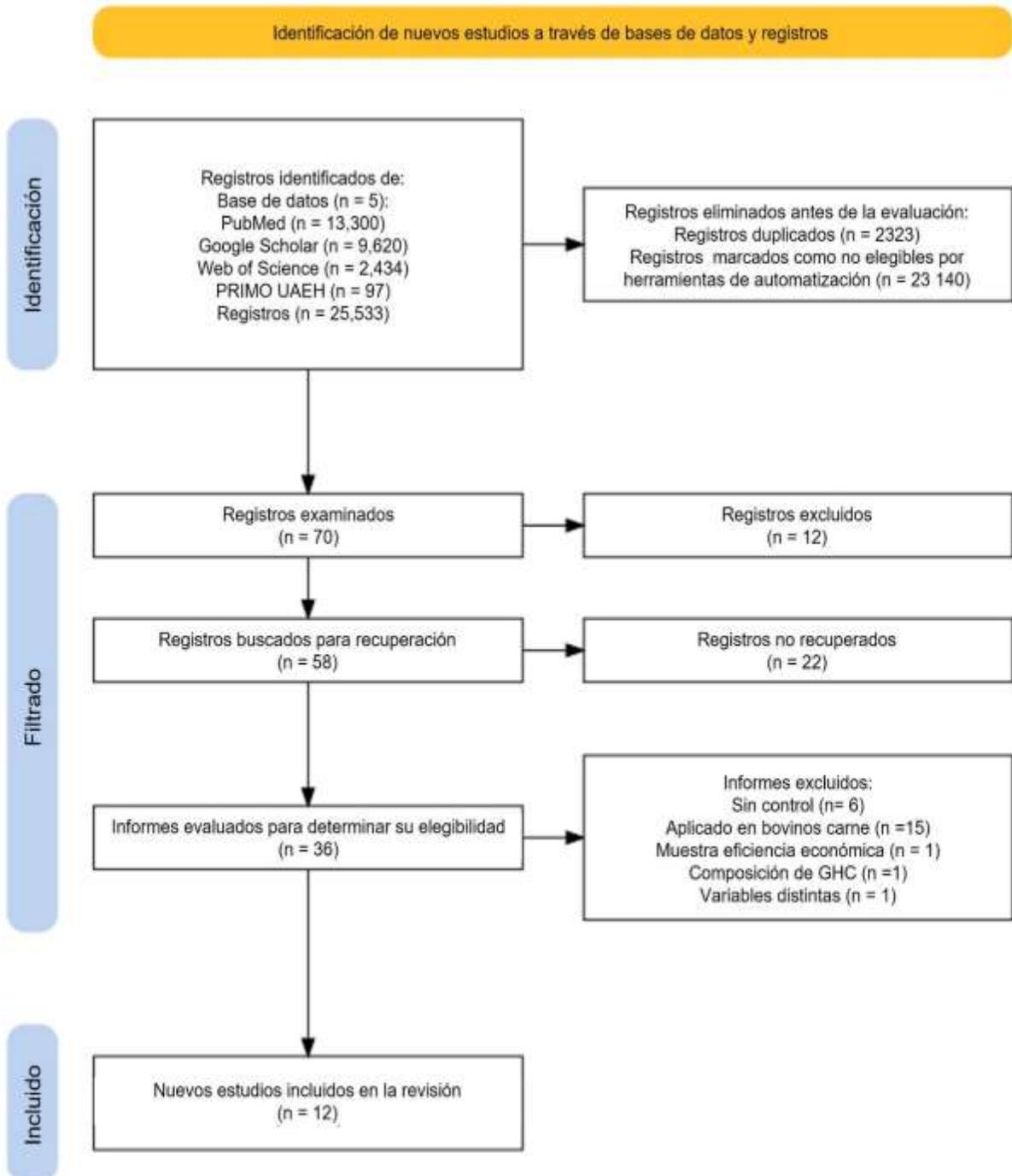


Figura 4. Esquema del proceso de búsqueda y filtrado de artículos para el metaanálisis.

6.1.2 Procedimientos estadísticos

El modelo de efectos aleatorios implementado en el presente trabajo asume que la diferencia observada entre estudios es una combinación del azar y la variación genuina en los efectos de intervención. Cada estudio es una comparación entre el grupo alimentado con algún subproducto de cervecería y el grupo testigo. El modelo del efecto aleatorio utilizado fue la aproximación propuesta por DerSimonian y Laird (2015).

Para mostrar el efecto global observado entre tratamientos se utilizó la diferencia media estandarizada (SMD), la cual fue calculada de acuerdo con el método propuesto por Hedges (1981). Así mismo, el intervalo de confianza al 95 % (95 % CI) fue calculado para cada uno de los estudios y el tamaño del efecto se asumió con distribución estándar normal.

La diferencia media cruda (RMD) se calculó para las variables de respuesta que comparten las mismas escalas, lo que permite interpretar el efecto resumen en unidades de medida originales (Appuhamy et al., 2013). La heterogeneidad se evaluó mediante la estimación de la varianza (s^2) de efectos aleatorios entre estudios y el porcentaje de variabilidad explicada por la heterogeneidad (I^2) en lugar de la varianza simple (Higgins et al., 2003).

6.2. Fase II: Parámetros de fermentación ruminal *in vitro*

6.2.1 Área de estudio

Esta fase se realizó en el Laboratorio de Nutrición Animal del Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, localizado en Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México.

6.2.2 Desarrollo experimental

Se elaboraron dietas isoenergéticas e isoproteicas (Cuadro 4) con el simulador de balanceo de raciones para vacas lecheras (NASEM, 2021) tomando en cuenta características de la vaca como edad, peso vivo, días de gestación, condición corporal, días en producción, número de lactación y producción de leche.

Cuadro 4. Dietas experimentales y composición química calculada.

Ítem	GHC0	GHC15	GHC30
Ingredientes, g kg⁻¹ MS			
Maíz rolado	342.50	256.20	118.00
Pasta de soya	143.70	113.90	0.00
Cascarilla de soya	207.50	220.60	243.90
Grasa protegida	0	0	13.40
Granos húmedos de cervecería	0	237.00	524.80
Forraje fresco de pradera	87.30	84.00	80.30
Alfalfa fresca	218.90	88.30	19.70
Composición química			
Materia seca, g kg ⁻¹	392	359	291
Materia orgánica, g kg ⁻¹ MS	821	787	729
Proteína cruda, g kg ⁻¹ MS	210	210	210
Energía neta de lactación, Mcal kg ⁻¹ MS	1.85	1.84	1.86
Fibra detergente neutro, g kg ⁻¹ MS	304	363	466
Fibra detergente ácido, g kg ⁻¹ MS	192	220	271

GHC0 = Dieta sin granos húmedos de cervecería; GHC15 = Dieta con 15 kg de granos húmedos de cervecería en BF; GHC30 = Dieta con 30 kg de granos húmedos de cervecería en BF; MS = materia seca.

El líquido ruminal utilizado como inóculo fue obtenido de tres becerros canulados pertenecientes al Colegio de Postgraduados (COLPOS), campus Montecillo, Texcoco, Estado de México. Los becerros son manejados de acuerdo con la NOM-062-ZOO-199, que especifica técnicas para la producción, cuidado y uso de los animales de laboratorio; los animales fueron alimentados con 70 % forraje y 30 % de concentrado comercial. Una vez en el laboratorio, este líquido ruminal fue filtrado tres veces consecutivas con manta de cielo. Se prepararon las soluciones de macrominerales, microminerales, amortiguadora, resazurina y reductora de acuerdo con la técnica de Theodorou et al. (1994). El Cuadro 5 muestra las proporciones utilizadas para estas soluciones.

Cuadro 5. Nombre común, fórmula química y cantidad de reactivos utilizados para las soluciones amortiguadora, macromineral, micromineral y reductora.

Ítem	Fórmula Química	Cantidad
Agua destilada / cantidad utilizada*		718.98 ml
Solución amortiguadora		
Bicarbonato de amonio	NH ₄ HCO ₃	4 g
Bicarbonato de sodio	NaHCO ₃	5 g
Aforo con agua destilada / cantidad utilizada*		1000 ml / 359.49 ml
Solución de macromineral		
Fosfato de sodio dibásico	Na ₂ HPO ₄	5.7 g
Fosfato de potasio monobásico	KH ₂ PO ₄	6.2 g
Sulfato de magnesio heptahidratado	MgSO ₄ • 7H ₂ O	0.6 g
Aforo con agua destilada / cantidad utilizada*		1000 ml / 359.49 ml
Solución de micromineral		
Cloruro de calcio dihidratado	CaCl ₂ • 2H ₂ O	13.2 g
Cloruro de magnesio tetrahidratado	MnCl • 4H ₂ O	10 g
Cloruro de cobalto hexahidratado	CoCl • 6H ₂ O	1 g
Cloruro férrico	FeCl ₃	8 g
Aforo con agua destilada / cantidad utilizada*		100 ml / 0.18 ml
Resazurina		
Resazurina al 0.1 %		1.85 ml
Solución reductora		
Sulfato de sodio anhidro	Na ₂ SO ₄	0.57 g
Hidróxido de sodio al 0.1 N	NaOH	4 ml
Aforo con agua destilada / cantidad utilizada*		100 ml / 72 ml
Líquido ruminal / cantidad utilizada*		720 ml

*cantidad utilizada para 54 frascos con aforo a 40 ml.

En un matraz de bola de 2.2 litros, sobre una placa de calentamiento, se agregaron en orden las soluciones antes mencionadas, manteniendo una temperatura del medio de 39° C y agitando con barra magnética. Posteriormente, se acondicionó un medio anaerobio con la incorporación constante de CO₂; después de cinco minutos se agregó el líquido ruminal.

En cada vial ámbar, con capacidad de 100 ml, se agregó 0.5 g de las dietas integrales de los distintos tratamientos por sextuplicado y un grupo testigo sin

muestra. En todos los viales se agregaron 40 ml del medio de cultivo y se gasificaron durante 12 segundos con CO₂, inmediatamente después se sellaron con un septo de butilo fijado con capsula de aluminio. Los viales se incubaron en un baño María a 39°C por 72 h.

8.2.3 Registro del volumen de gas

La producción de gas se midió con una bureta de precisión, mediante el desplazamiento de agua debido a la presión de gas generado en los viales. Las mediciones se registraron a las 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 36, 44, 52 y 72 horas de incubación. El gas producido se liberó después de realizar cada lectura.

Los parámetros del modelo de Gompertz fueron estimados mediante regresión no lineal a través de un proceso iterativo implementado en el software R, utilizando el paquete minpack.lm. La implementación del modelo se basó en la ecuación 1, como sigue:

$$V(t) = A \cdot \exp(-\exp(-b \cdot (a - es))) \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

V (t)= volumen;

A = volumen asintótico máximo de gas producido;

b = constante tasa de cambio;

es = tiempo en el que la tasa de producción es máxima.

Al finalizar la incubación, se retiraron las tapas e inmediatamente se registró el pH con un potenciómetro de mesa (Hanna®).

En filtros de poro fino se recuperó el residuo; dichos filtros con el residuo se introdujeron en un horno de secado a 100° C por 48 h.

La desaparición de la materia seca se calculó con la siguiendo la fórmula 2:

$$100 - \frac{\textit{peso final}}{\textit{peso inicial}} \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

Todas las muestras secas se introdujeron a la mufla a 550° C durante 5.5 horas. El contenido de materia orgánica degradada se calculó siguiendo la fórmula 3, como sigue:

$$100 - \frac{\text{peso final}}{\text{peso inicial}} \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

8.2.4 Análisis estadístico

Los datos de fermentación ruminal *in vitro* y la degradabilidad de la materia seca y materia orgánica fueron analizados con el PROC GLM de SAS (2002) con un modelo completamente al azar, presentado en la fórmula 4:

$$Y_{ij} = \mu + D_i + \varepsilon_{ij} \dots\dots\dots (4)$$

Donde:

Y_{ij} = es la variable respuesta;

μ = es la media general;

D_i = es el efecto del tratamiento;

ε_{ij} = es el error residual.

En aquellas variables donde se observó significancia ($P < 0.05$) se aplicó la prueba de Tukey para la comparación de medias.

8.3. Fase III: Rendimiento productivo en vacas

Todos los procedimientos utilizados en este estudio se realizaron con la aprobación del Comité Institucional de Ética para el Cuidado y Uso de Animales de Laboratorio de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (Folio de Aprobación: CICUAL-V-I / 012/ 2023) y en conformidad con las normas sanitarias y de bienestar animal establecidas por la Norma Oficial Mexicana para las especificaciones técnicas para la producción, cuidado y uso de animales de laboratorio (NOM-062-ZOO-1999).

8.3.1. Área de estudio

El estudio se desarrolló en los meses de marzo, abril y mayo de 2024, en la unidad de producción “Rancho Los Monteros”, ubicado en la localidad de El transformador, municipio de Acatlán, en el estado de Hidalgo. Esta unidad se encuentra en las coordenadas 20.180686, -98.425553 (Google Maps®) y a una altitud de 2,121 metros. El clima es semiseco templado, con temperatura media anual de 15° C y precipitación anual de 600 mm, con lluvias en verano.

Los análisis químicos se realizaron en el Laboratorio de Nutrición Animal del Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, localizado en Tulancingo de Bravo. Las coordenadas son 20.061528, -98.381599 (Google Maps®) y tiene una altitud de 2160 metros. La temperatura media anual es de 14° C y tiene una precipitación pluvial anual de 550 mm.

8.3.2. Tamaño de muestra

El número de animales para este experimento fue determinado con el programa G-Power, teniendo en cuenta los siguientes datos: cinco mediciones, tres tratamientos, un valor de α de 0.05 y el tamaño del efecto de 0.55 para el rendimiento lechero obtenido de un metaanálisis donde se midió el efecto del uso de subproductos de cervecaría en vacas lecheras (Sánchez-Otero et al., 2023).

La Figura 5 muestra un gráfico que incluye el número de animales y la potencia, por lo que se utilizaron 15 animales con la finalidad de observar una mayor confiabilidad de nuestros resultados.

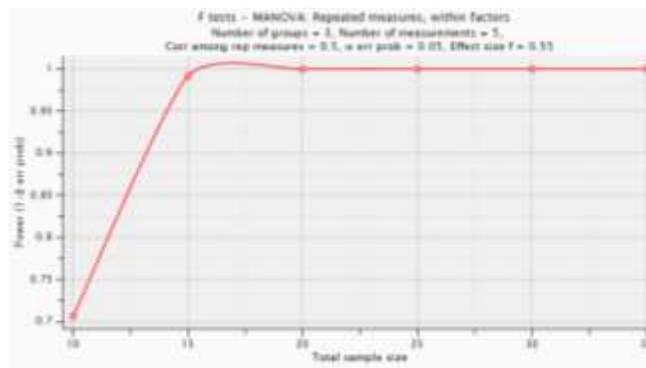


Figura 5. Representación gráfica del tamaño de muestra.

8.3.3. Características de los animales

Se utilizaron 15 vacas encastadas con Holstein, multíparas, con 4.32 ± 0.7 años, en el segundo tercio de lactación, con una producción de leche diaria de 23.53 ± 2.58 kg, un peso vivo de 481 ± 120 kg, con 2.8 ± 0.6 lactaciones y 158 ± 54 días en lactación.

8.3.4. Diseño experimental y tratamientos

El diseño experimental fue completamente al azar con mediciones repetidas en el tiempo. Las vacas se distribuyeron de manera aleatoria a uno de los tres tratamientos, los cuales fueron: GHC0 = Dieta integral sin granos húmedos de cervecería; GHC15 = Dieta integral con 15 kg en base fresca (BF) de granos húmedos de cervecería; GHC30 = Dieta integral con 30 kg en BF de granos húmedos de cervecería. Las dietas fueron formuladas con el simulador de balanceo de raciones para vacas lecheras (NASEM 2021) mostradas en el Cuadro 4.

8.3.5. Desarrollo del ensayo

En el establo, las vacas fueron alojadas grupalmente por tratamiento en corrales provistos de comederos y bebederos. En todo momento, las vacas tuvieron disponibilidad de agua limpia. Es importante mencionar que las vacas tuvieron acceso al 69 % de consumo de materia seca total, según el simulador de dietas del NASEM (2021), esto debido a la escasez de forraje por la sequía extendida en la región y a los altos costos de los insumos externos.

Las vacas fueron ordeñadas dos veces al día de manera mecánica (matutino: 5:00 – 07:00 h y vespertino: 17:00 – 19:00 h). La alimentación fue mixta, posterior al ordeño se ofreció por vaca 1.41 kg de cascarilla de soya y 1.70 kg de maíz rolo. Las vacas permanecieron en la pradera de 10 a 13 h, posteriormente fueron trasladadas al establo donde se les ofreció la dieta de acuerdo con el tratamiento asignado. Al finalizar el ordeño vespertino, los animales se alimentaron con 2 kg cascarilla de soya (Figura 6).

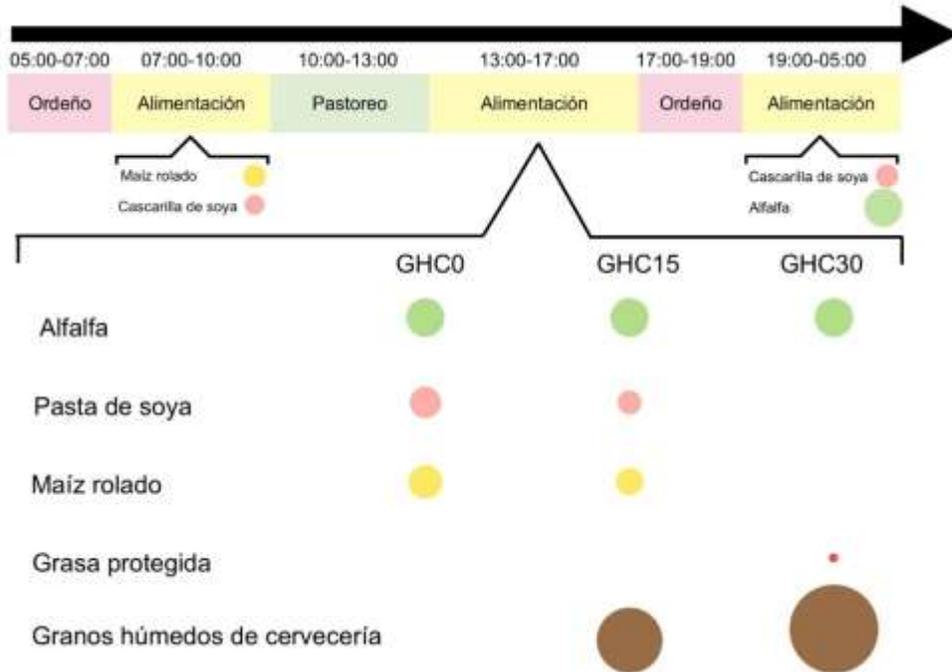


Figura 6. Manejo alimenticio de las vacas en producción en el ensayo.

La cantidad de los ingredientes se representa con el tamaño del círculo, el color representa los ingredientes utilizados en los diferentes momentos de oferta de alimento.

8.3.6. Manejo y asignación de praderas

La superficie total de la pradera es de seis hectáreas y la edad de los forrajes fue de cuatro años aproximadamente. Los forrajes que predominaban fueron *Cynodon plectostachyus*, *Trifolium repens* y *Medicago sativa*, con una relación de 50 % gramíneas y 30 % leguminosas, el 20 % restante lo componían malezas como huazontle silvestre (*Chenopodium berlandieri*) y pasto popotillo (*Schizachyrium scoparium*), comunes en la región. El manejo agronómico consistió en fertilización con abono de bovino cada 12 meses y riego mensual por inundación de una presa comunal. La asignación de la pradera para el total de las vacas fue de 1500 m² por día.

8.3.7. Muestreo y registro de datos

En cada medición, se recolectaron 500 g de muestra de cada uno de los ingredientes utilizados en las dietas antes de ofrecerlos a los animales. Las

muestras se conservaron en bolsa de nylon y se congelaron a -18°C hasta su posterior análisis.

El consumo de materia seca de los alimentos ofrecidos en el establo se obtuvo por la diferencia entre el alimento ofrecido y el rechazado. El consumo de forraje en la pradera se estimó con el método descrito por Macoon et al. (2003), por lo que se obtuvo la diferencia entre el requerimiento de energía neta para lactancia (ENI, Mcal por día) según las ecuaciones de predicción del NRC (2001) y el aporte de ENI de los ingredientes que componían la dieta integral. El contenido de ENI por kg de MS de cada uno de los ingredientes se obtuvo de la composición química reportadas por el NRC (2001).

Se registró la producción de leche individual en ambos ordeños (05:00 y 17:00 h). Además, se tomó una muestra de leche de 50 ml en cada ordeño, al final del día se obtuvo una alícuota proporcional a cada ordeño y se determinó el contenido de grasa, proteína, lactosa y sólidos no grasos con un analizador de leche (LACTOSCAN SP®, Germany).

8.3.8. Análisis de laboratorio

Los ingredientes con alta cantidad de humedad se secaron con estufa de aire forzado a 55°C por 72 horas. Posteriormente, todos los ingredientes se molieron y tamizaron con maya de 2 um para determinar el contenido de materia seca (MS) con horno de secado (TERLAB®) a 100°C por 24 horas. Después, se determinó el contenido de cenizas por incineración de la muestra a 550°C durante 5.5 horas en la mufla (THERMO SCIENTIFIC®), de acuerdo con el método descrito en la AOAC (2012). La determinación de proteína cruda fue realizada por el método Kjeldahl (954.01; AOAC, 2012). Para medir el extracto etéreo se utilizó el método de Soxhlet utilizando hexano como solvente orgánico. La fibra detergente neutro y fibra detergente ácido se realizaron por el método de Van Soest (1991). La energía neta de lactación de la dieta integral se calculó de acuerdo con la simulación del NASEM (2021).

8.3.9. Análisis de costos

Para conocer la rentabilidad acorde a la alimentación se utilizó la metodología de análisis de costos parciales, la cual considera el precio de venta de leche menos el costo de los ingredientes utilizados en cada una de las dietas. Los resultados se muestran en dólares americanos (Harper et al., 2019).

8.3.10. Análisis estadístico

Los datos obtenidos de rendimiento productivo y la composición química de la leche fueron analizados PROC MIXED de SAS (2002), utilizando como efectos fijos los tratamientos y días de medición, y como efecto aleatorio el animal. El modelo estadístico utilizado fue:

$$Y_{ijkl} = \mu + C_i + Tx_{(i)j} + M_k + (Tx * M)_{jk} + \epsilon_{ijkl} \dots \dots \dots (5)$$

Donde:

Y_{ijkl} = es la variable respuesta;

μ = es la media general;

C_i = es el efecto de la vaca;

$Tx_{(i)j}$ = es el efecto del tratamiento,

M_k = es el efecto del muestreo;

$(Tx * M)_{jk}$ = es el efecto de la interacción del tratamiento con el muestreo;

ϵ_{ijkl} = es el error residual.

En aquellas variables donde se observó significancia ($P < 0.05$) se aplicó la prueba de Tukey para la comparación de medias.

Se realizaron polinomios ortogonales en los efectos de tratamiento y mediciones. Se utilizó una $P < 0.05$ para considerarse significativo.

VII. RESULTADOS

9.1 Metaanálisis sobre la inclusión de subproductos de cervecería en la dieta

Al finalizar la revisión analítica, con la estrategia de búsqueda utilizada, se contabilizaron 55 artículos, de los cuales, algunos fueron excluidos. Posteriormente, con los criterios de inclusión y exclusión se incluyeron 12 artículos con un total de 27 ensayos. En el Cuadro 6 se presentan las características de los ensayos incluidos en el metaanálisis.

Cuadro 6. Estudios, características de los animales, subproducto utilizado, inclusión en la dieta, lavado y diseño experimental incluidos en el metaanálisis.

Estudio	Raza	TL	Subproducto	Inclusión, %	Lavado	Diseño
Belibasakis y Tsirgogianni (1996)	H	1 ^{er}	GHC	16	14 días	Cross
Chiou et al. (1997)	H	2 ^{do}	GHC	10	7 días	Cross
Cozzi y Polan. (1994)	H	2 ^{do}	GSC	16	21 días	Cross
Feccenda et al. (2017)	H	1 ^{er}	GSC	3.25, 7.81, 15.49, 31.37	14 días	Cross
Firkins et al. (2002)	H	1 ^{er}	GHC	8.65, 17.29, 25.94	-	Nocross
Imaizumi et al. (2015)	H	2 ^{do}	GHC	10, 20	10 días	Cross
Li et al. (2020)	H	1 ^{er}	MS	13.3	27 días	Cross
Miyazawa et al. (2007)	H	2 ^{do}	GHC	9.3	7 días	Cross
Murdock et al. (1981)	H	1 ^{er}	GHC	14.4, 30.0	-	Nocross
Polan et al. (1985)	H	2 ^{do}	GSC, GHC	11, 17.4, 24.2, 13, 20.6, 29	-	Cross
West y Martin (1993)	J	2 ^{do}	GHC	15, 30	14 días	Nocross
Younker et al. (1998)	H	3 ^{er}	GSC	11.75, 11.75	11 días	Cross

H = Holstein; J = Jersey; TL = Tercio de lactación; GHC = Granos húmedos de cervecería; GSC = Granos secos de cervecería; MS = Malt sprouts (raicilla); Cross = Crossover; NoCross = No crossover.

Los criterios de exclusión fueron: no son considerados artículos científicos o se encontraban duplicados, la redacción no era en idioma inglés, el año de publicación fue anterior a 1980, presentaban eficiencia económica, era aplicado en ganado de engorda, puntualizaba en la composición nutricional del ingrediente, no incluían grupo control en el diseño experimental, no reportan alguna medida de variabilidad.

Los granos húmedos de cervecería fueron el ingrediente con mayor cantidad de ensayos (54 %), seguido de los granos en forma seca (38 %) y los malt sprouts (raicilla) (8 %).

9.1.1 Rendimiento y composición química de la leche

La inclusión de granos húmedos de cervecería en raciones de vacas tiene un efecto positivo sobre la producción de leche (DME = +0.55; P = 0.004) con un incremento bruto de 0.89 kg d⁻¹ (P = 0.006).

Cuadro 7. Tamaño del efecto de la inclusión de subproductos de cervecería sobre el rendimiento y composición química de la leche.

Ítem	n	Media contro l (DE)	DME (95 % CI)	P <	DMB (95 % CI)	P <	Heterogeneidad	
							I ² (%)	P <
Producción de leche (kg d⁻¹)	27	26.78 (4.0)	+0.55 (0.17, 0.92)	0.004	+0.89 (0.25, 1.53)	0.006	64.3	0.001
Grasa (%)	26	3.75 (1.0)	-0.15 (-0.39, 0.07)	0.180	-0.14 (-0.31, 0.32)	0.110	42.8	0.010
Proteína (%)	24	3.27 (0.5)	+0.10 (0.12, 0.33)	0.370	+0.004 (-0.02, 0.03)	0.770	0.0	0.860
Lactosa (%)	11	4.61 (1.2)	+0.03 (-0.04, 0.12)	0.390	-0.003 (-0.086, 0.079)	0.930	0.0	0.990
CMS (kg d⁻¹)	25	19.1 (1.9)	+0.42 (-0.44, 1.31)	0.330	+0.17 (-0.14, 0.50)	0.280	51.0	0.001

n= número de estudios que compararon tratamientos con granos húmedos de cervecería y sin granos húmedos de cervecería. DE = desviación estándar, DME = diferencia media estandarizada, DMB = diferencia media bruta, CI = intervalo de confianza, P< = valor de la probabilidad, CMS = consumo de materia seca.

La respuesta a la inclusión de GHC en la producción láctea manifiesta una elevada heterogeneidad (I² = 64 %; Cuadro 7), por lo que es necesario explorar las fuentes de variabilidad entre estudios a través de una meta-regresión. El contenido de grasa, proteína, lactosa y CMS no se vieron afectados por la inclusión de GHC en las raciones (P>0.05).

La Figura 7 muestra el diagrama de bosque el cual indica el efecto de la inclusión de algún subproducto de cervecería sobre la producción lechera, observándose un aumento global de 0.55 kg al día.

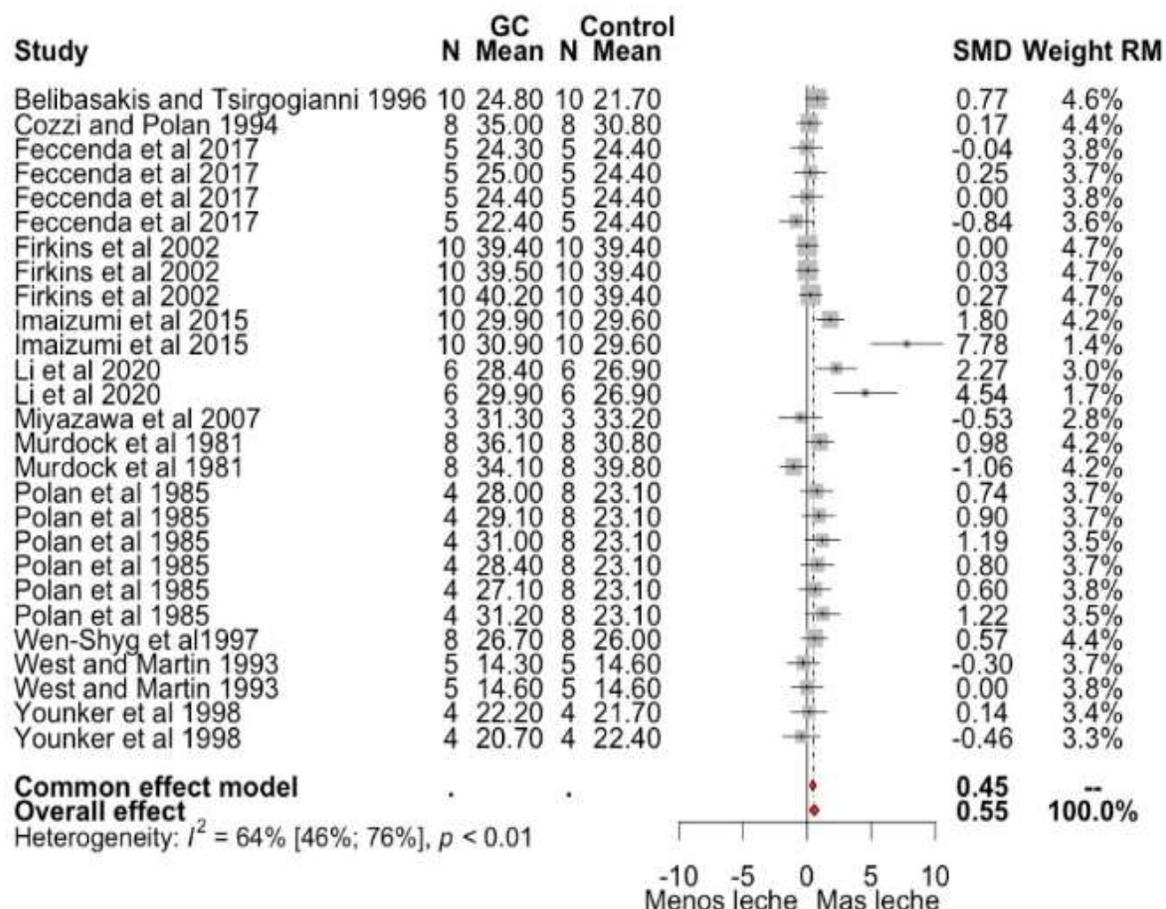


Figura 7. Diagrama de bosque de la producción de leche (kg día⁻¹) en ensayos con la inclusión de subproductos de cervecería en dietas de vacas lecheras.

El tamaño del punto refleja la ponderación relativa del estudio respecto al tamaño del efecto total estimado, donde un tamaño de punto mayor representa un peso mayor y el tamaño del efecto combinado se estima, incluidos los intervalos de confianza. El diamante representa el efecto global. RMD, diferencia media en bruto.

9.2 Efecto de la inclusión de granos húmedos de cervecería sobre los parámetros de la fermentación ruminal *in vitro*

9.2.1 Parámetros de fermentación

El pH a las 72 h presentó diferencias ($P < 0.05$), siendo mayor para el grupo con 30 kg de inclusión de granos húmedos de cervecería. Los efectos de la dieta sobre la producción de gas total fueron distintos entre el tratamiento control y la dieta con 15 kg que incluía granos húmedos de cervecería respecto a la dieta con 30 kg de GHC ($P < 0.05$) como se muestra en el Cuadro 7. Por otro lado, la degradación de la materia seca y de la materia orgánica no presentó diferencias significativas entre tratamientos ($P > 0.05$).

Cuadro 8. Parámetros de fermentación ruminal *in vitro* con la inclusión de distintos niveles de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas lecheras en producción.

Ítem	Tratamiento			EEM	P <
	GHC0	GHC15	GHC30		
Volumen máximo de gas, ml g ⁻¹	283.4 ^a	273.8 ^a	254.0 ^b	3.186	<0.001
Tasa de producción de gas, h ⁻¹	0.140 ^a	0.127 ^{ab}	0.112 ^b	0.004	0.001
Tiempo de retardo, h	5.923 ^b	6.558 ^b	7.965 ^a	0.192	<0.001
pH	6.451 ^b	6.49 ^b	6.581 ^a	0.012	<0.001
DMS, g kg ⁻¹ of DM	878	793	813	25.252	0.120
DMO, g kg ⁻¹ of DM	885	860	825	21.679	0.225

^{ab}: literales diferentes en la misma hilera son estadísticamente distintos ($P < 0.05$). EEM: Error estándar de la media. ³Tratamiento: GHC0 = dieta integral sin granos húmedos de cervecería; GHC15 = dieta integral con 15 kg de granos húmedos de cervecería; GHC30 = dieta integral con 30 kg de granos húmedos de cervecería. ⁴DMS: Digestibilidad de la materia seca ⁵DMO: Digestibilidad de la materia orgánica.

En la Figura 8 se puede observar la cinética de producción de gas *in vitro* entre los diferentes tratamientos, el tratamiento GHC0 tuvo una mayor producción de gas que estadísticamente no es diferente de GHC15 ($P>0.05$) pero la producción de gas con GHC30 si fue menor que los otros tratamientos ($P<0.05$).

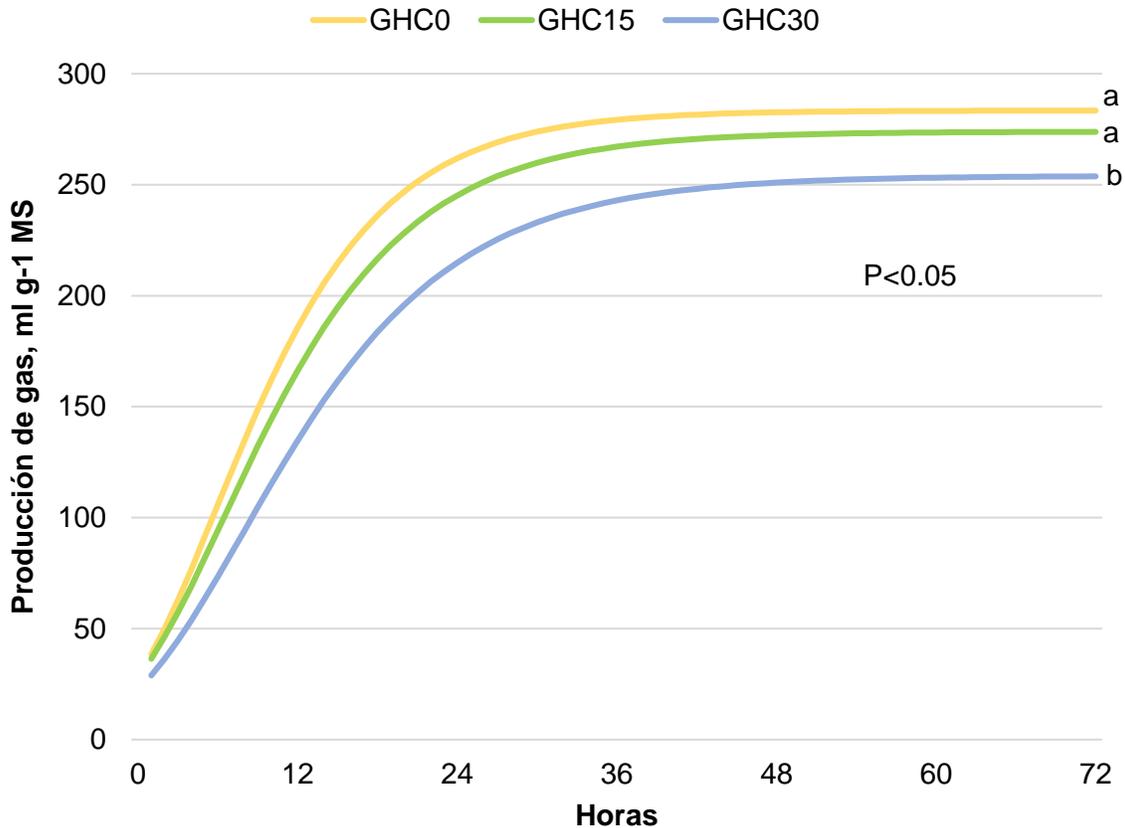


Figura 8. Cinética de fermentación ruminal *in vitro* con la inclusión de distintos niveles de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas lecheras en producción.

^{ab} = literales diferentes son estadísticamente distintas ($P<0.05$). GHC0 = dieta integral sin granos húmedos de cervecería; GHC15 = dieta integral con 15 kg de granos húmedos de cervecería; GHC30 = dieta integral con 30 kg de granos húmedos de cervecería.

9.3 Efecto de la inclusión de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas Holstein

9.3.1 Producción y composición química de la leche

Las vacas con el tratamiento GHC15 produjeron 19 % más leche en comparación con las vacas con GHC30 ($P < 0.05$) (Figura 9). Así mismo, se redujo linealmente ($P < 0.05$) el rendimiento lechero de vacas alimentadas con 30 kg en BH de GHC en su dieta.

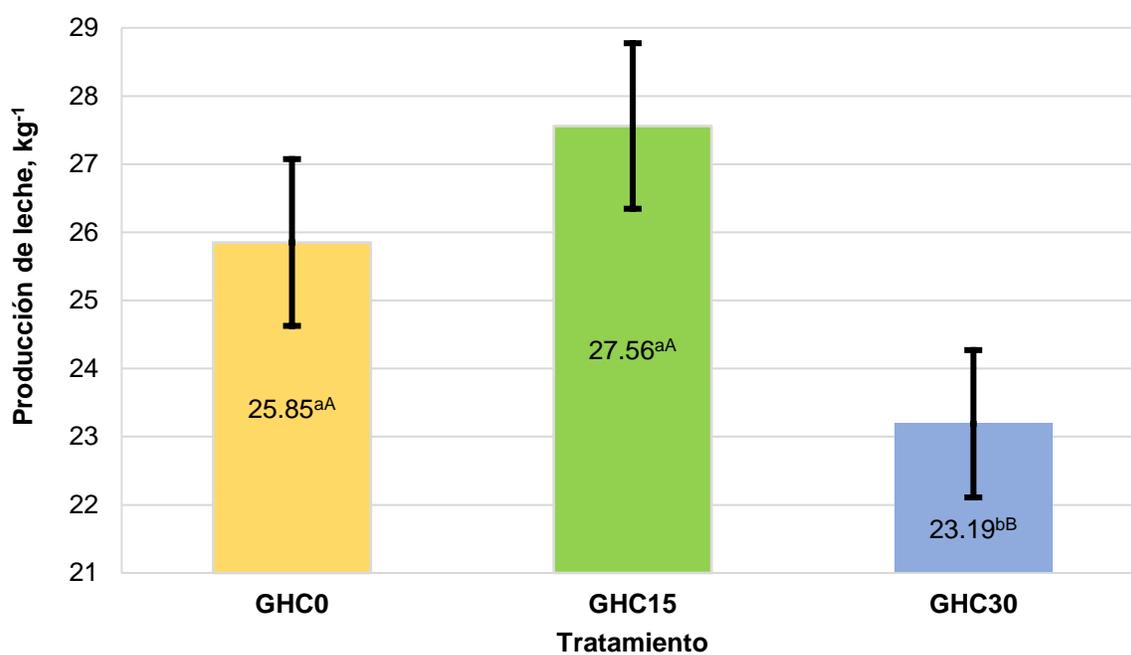


Figura 9. Efecto de la inclusión de distintos niveles de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas sobre la producción de leche.

Valores promedios con literal minúscula distinta es diferente ($P < 0.05$). Valores promedios con literal mayúscula distinta es diferente ($P < 0.05$) con análisis de Polinomios ortogonales. GHC0 = dieta integral sin granos húmedos de cervecería; GHC15 = dieta integral con 15 kg de granos húmedos de cervecería; GHC30 = dieta integral con 30 kg de granos húmedos de cervecería.

El contenido de grasa, proteína, lactosa y sólidos no grasos no fue distinto entre tratamientos ($P > 0.05$); sin embargo, se observó un efecto cuadrático ($P < 0.05$) en la proteína, lactosa y sólidos no grasos, este efecto es debido a que en el tratamiento GHC30 redujo exponencialmente el porcentaje de estos componentes.

Cuadro 9. Efecto de la inclusión de distintos niveles de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas sobre los componentes químicos de la leche.

Ítem	Tratamiento			EEM	P <	Polinomios ortogonales†
	GHC0	GHC15	GHC30			
Grasa, %	3.014	2.796	2.647	0.28	0.63	NS
Proteína, %	3.426 ^A	3.382 ^A	3.250 ^B	0.03	0.10	C
Lactosa, %	5.142 ^A	5.071 ^A	4.882 ^B	0.08	0.10	C
Sólidos no grasos, %	9.353 ^A	9.204 ^A	8.870 ^B	0.16	0.10	C

Valores promedios con literal mayúscula distinta en la misma fila es diferente ($P < 0.05$) y corresponde a la abreviación siguiente = L, lineal; C, cuadrático; Q, cúbico; K, cuartico. NS = no significativo ($P > 0.05$). GHC0 = dieta integral sin granos húmedos de cervecería; GHC15 = dieta integral con 15 kg de granos húmedos de cervecería; GHC30 = dieta integral con 30 kg de granos húmedos de cervecería EEM = error estándar de la media.

La producción de leche y el contenido de grasa no fue distinto a través del tiempo ($P > 0.05$); por el contrario, los contenidos de proteína, lactosa y sólidos no grasos aumentaron linealmente ($P < 0.05$) conforme avanzó el ensayo, siendo el de mayor concentración el muestreo 5. Como se representa en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Efecto del día de muestreo sobre la producción de leche y sus componentes químicos de la leche.

Ítem	Muestreo					EEM	P <	Polinomios ortogonales†
	1	2	3	4	5			
Producción de leche, kg d ⁻¹	24.914	25.72	26.167	25.815	25.07	0.805	0.245	NS
Grasa, %	2.868	2.853	2.782	2.890	2.702	0.175	0.556	NS
Proteína, %	3.340 ^{bcAB}	3.305 ^{cB}	3.345 ^{bcAB}	3.374 ^{abAB}	3.400 ^{aA}	0.060	0.001	L
Lactosa, %	5.018 ^{aAB}	4.963 ^{bB}	5.028 ^{aAB}	5.064 ^{aAB}	5.085 ^{aA}	0.050	<0.001	L
Sólidos no grasos, %	9.112 ^{bcAB}	9.028 ^{cB}	9.129 ^{bAB}	9.187 ^{abAB}	9.255 ^{aA}	0.092	<0.001	L

Valores promedios con literal minúscula distinta en la misma fila es diferente ($P < 0.05$). Valores promedios con literal mayúscula distinta en la misma fila es diferente ($P < 0.05$) y corresponde a la abreviación siguiente = L, lineal; C, cuadrático; Q, cúbico; K, cuartico. NS = no significativo ($P > 0.05$). EEM = error estándar de la media.

El contenido de proteína, lactosa y sólidos no grasos tuvieron un efecto de interacción entre el tratamiento y el día de muestreo ($P < 0.05$). Esta interacción se debió a que, en el cuarto muestreo, los contenidos de estos sólidos en las vacas con el tratamiento GHC30 no fueron diferentes al segundo muestreo respecto a los

otros tratamientos (Figura 10). Es importante destacar que las vacas que consumieron el tratamiento GHC30 presentaron valores inferiores en comparación con los grupos GHC0 y GHC15, tal como se observa en la Figura 10.

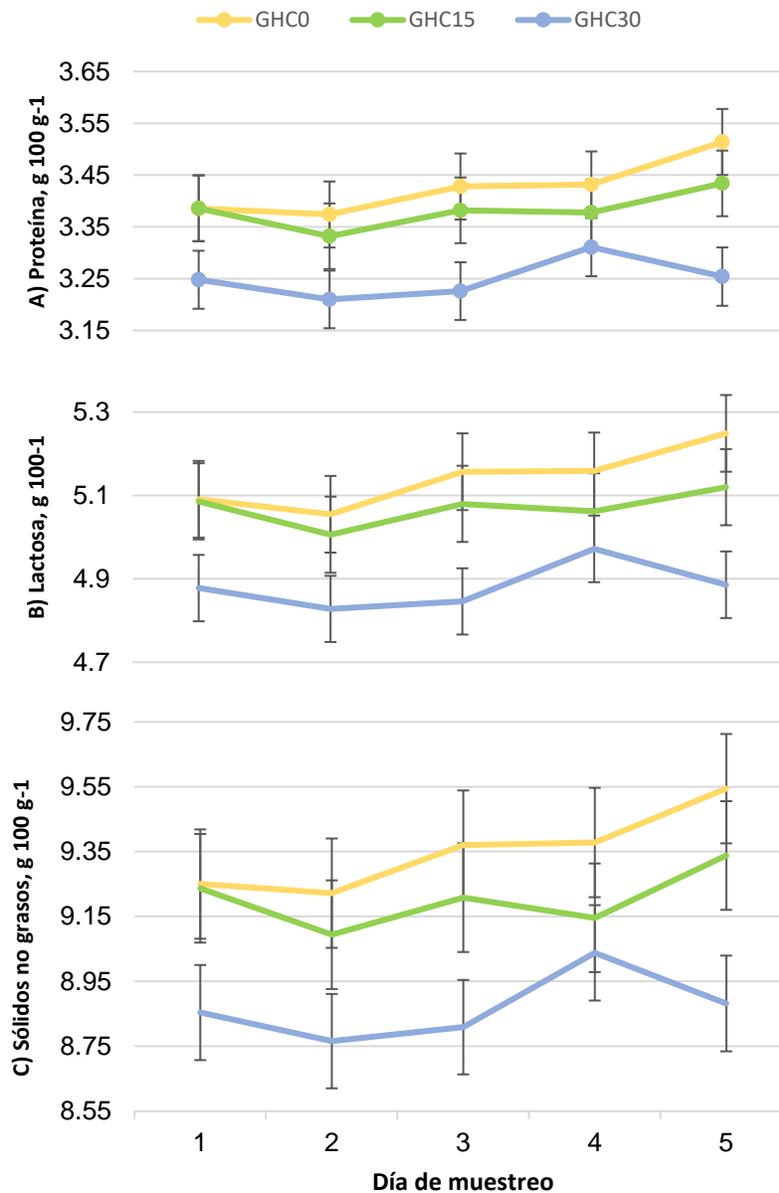


Figura 10. Efecto de la interacción entre el nivel de inclusión de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas y el día muestreo sobre los contenidos de proteína, lactosa y sólidos no grasos de la leche.

GHC0 = dieta integral sin granos húmedos de cervecería; GHC15 = dieta integral con 15 kg de granos húmedos de cervecería; GHC30 = dieta integral con 30 kg de granos húmedos de cervecería.

Las vacas en el tratamiento GHC15 tuvieron mayor rendimiento en leche, de proteína, lactosa y sólidos no grasos (23.0, 22.8 y 22.7 %, respectivamente) comparadas con las vacas en el tratamiento GHC30 ($P < 0.05$).

Cuadro 11. Efecto de la inclusión de distintos niveles de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas sobre el rendimiento de componentes químicos de la leche.

Ítem	Tratamiento			EEM	P <	Polinomios ortogonales†
	GHC0	GHC15	GHC30			
Grasa, g día ⁻¹	765 ^A	783 ^A	601 ^B	74.84	0.157	C
Proteína, g día ⁻¹	885 ^{abA}	928 ^{aA}	754 ^{bbB}	37.98	0.009	C
Lactosa, g día ⁻¹	1328 ^{abA}	1392 ^{aA}	1133 ^{bbB}	56.97	0.009	C
Sólidos no grasos, g día ⁻¹	2417 ^{aA}	2528 ^{aA}	2060 ^{bbB}	103.58	0.010	C

Valores promedios con literal minúscula distinta en la misma fila es diferente ($P < 0.05$). Valores promedios con literal mayúscula distinta en la misma fila es diferente ($P < 0.05$) y corresponde a la abreviación siguiente = L, lineal; C, cuadrático; Q, cúbico; K, cuartico. NS = no significativo ($P > 0.05$). EEM = error estándar de la media.

Los rendimientos de grasa, proteína, lactosa y sólidos no grasos no fueron afectados por el día de muestreo ($P < 0.05$) como se muestra en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Efecto del día de muestreo sobre el rendimiento de componentes químicos de la leche.

Ítem	Muestreo					EEM	P <	Polinomios ortogonales†
	1	2	3	4	5			
Grasa, g día ⁻¹	708	723	722	753	675	47.479	0.300	NS
Proteína, g día ⁻¹	830	849	877	871	852	25.339	0.297	NS
Lactosa, g día ⁻¹	1246	1275	1318	1308	1277	38.104	0.263	NS
Sólidos no grasos, g día ⁻¹	2265	2320	2393	2372	2323	69.052	0.297	NS

Valores promedios con literal minúscula distinta en la misma fila es diferente ($P < 0.05$). Valores promedios con literal mayúscula distinta en la misma fila es diferente ($P < 0.05$) y corresponde a la abreviación siguiente = L, lineal; C, cuadrático; Q, cúbico; K, cuartico. NS = no significativo ($P > 0.05$). EEM = error estándar de la media.

No se presentó efecto de interacción del tratamiento con el muestreo sobre el rendimiento de grasa, proteína, lactosa y sólidos no grasos ($P>0.05$).

No se observó diferencia entre tratamientos, día de muestreo y su interacción en la ingesta total de materia seca, la ingesta de acuerdo con su peso vivo y eficiencia alimenticia ($P<0.05$), como se muestran en los Cuadros 13 y 14.

Cuadro 13. Efecto de la inclusión de distintos niveles de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas sobre la ingesta total de materia seca, la ingesta de acuerdo con su peso vivo y eficiencia alimenticia.

Ítem	Tratamiento			EEM	P <	Polinomios ortogonales [†]
	GHC0	GHC15	GHC30			
Ingesta total de materia seca	14.91 ^A	14.05 ^A	12.82 ^B	0.471	0.146	C
Ingesta, % de peso vivo	2.69	2.69	2.49	0.087	0.465	NS
Eficiencia alimentaria	1.72 ^A	1.97 ^A	0.12 ^B	0.072	0.393	C

Valores promedios con literal minúscula distinta en la misma fila es diferente ($P<0.05$). Valores promedios con literal mayúscula distinta en la misma fila es diferente ($P<0.05$) y corresponde a la abreviación siguiente = L, lineal; C, cuadrático; Q, cúbico; K, cuartico. NS = no significativo ($P>0.05$). EEM = error estándar de la media.

Cuadro 14. Efecto del día de muestreo sobre la ingesta total de materia seca, la ingesta de acuerdo con su peso vivo y eficiencia alimenticia.

Ítem	Muestreo					EEM	P <	Polinomios ortogonales [†]
	1	2	3	4	5			
Ingesta total de materia seca	13.63	13.78	14.17	14.35	13.71	0.471	0.181	NS
Ingesta, % de peso vivo	2.57	2.59	2.67	2.70	2.59	0.087	0.120	NS
Eficiencia alimentaria	1.84	1.88	1.86	1.81	1.83	0.072	0.472	NS

Valores promedios con literal minúscula distinta en la misma fila es diferente ($P<0.05$). Valores promedios con literal mayúscula distinta en la misma fila es diferente ($P<0.05$) y corresponde a la abreviación siguiente = L, lineal; C, cuadrático; Q, cúbico; K, cuartico. NS = no significativo ($P>0.05$). EEM = error estándar de la media.

9.3.2 Análisis de costos

El ingreso por venta de leche para BHC15 fue de \$99.9 USD más comparado con BHC0 y \$186.7 USD más con respecto a BHC30 ($P < 0.05$). El margen total fue 29.4 y 60.5 % mayor ($P < 0.05$) en vacas alimentadas con BHC15 con respecto a las vacas alimentadas con BHC0 y BHC30 (Cuadro 15).

Cuadro 15. Análisis de costos parciales durante el ensayo.

Ítem	Tratamiento			EEM	P <
	GHC0	GHC15	GHC30		
Costos de la dieta, USD	\$352.70	\$344.64	\$317.73	12.96	0.178
Costo de GHC, USD	\$0.00 ^c	\$72.90 ^b	\$146.80 ^a	3.70	<0.001
Producción leche, kg en el periodo	1257 ^a	1277 ^b	1040 ^b	59.20	0.026
Costo por kg de leche, USD	\$0.30	\$0.27	\$0.32	0.01	0.073
Precio de leche, USD	\$0.58	\$0.58	\$0.58	-	-
Ingreso por venta de leche, USD	\$639.80 ^b	\$739.71 ^a	\$552.98 ^c	24.58	0.001
Margen total, USD	\$306.66 ^b	\$397.09 ^a	\$247.35 ^b	22.55	0.001
Margen por kg de leche, USD	\$0.27 ^{ab}	\$0.32 ^a	\$0.26 ^b	0.01	0.046
Costo/vaca/día, USD	\$7.39	\$7.05	\$7.08	0.28	0.649
Ingresos/costos de alimentación	1.92	2.22	2.10	0.09	0.120

^{abc} = literales diferentes en la misma hilera son estadísticamente distintos ($P < 0.05$). GHC0 = Dieta sin granos húmedos de cervecera, GHC15 = Dieta con 15 kg de granos húmedos de cervecera en BF, GHC30 = Dieta con 30 kg de granos húmedos de cervecera en BF. EEM = error estándar de la media. USD = dólares americanos (01-06-2024).

VIII. DISCUSIÓN GENERAL

Metaanálisis sobre la inclusión de subproductos de cervecería en la dieta

El subproducto de cervecería en bovinos destinados a carne fue el criterio más utilizado para la exclusión, seguido de la ausencia de un grupo control, resultando en la exclusión de 24 artículos. La raza Holstein predominó en los ensayos (93 %), esto posiblemente se deba a sus características: entre las cuales se encuentran homogeneidad en los hatos (Ruiz-López et al., 2024) y su adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales (Holstein Association USA, 2007). El periodo de lactancia en que se encontraban las vacas se distribuyó en primero, segundo y tercero con 44, 48 y 8 % respectivamente. Los granos húmedos de cervecería fueron el ingrediente utilizado en mayor cantidad de ensayos (54 %), seguido por los granos en forma seca (38 %) y los malt sprouts fueron los menos utilizados (8 %), una de las causas puede ser la facilidad del ingrediente húmedo por el proceso de producción y el costo que representa el secado de estos (Imaizumi, 2015). La relación forraje concentrado que más se utilizó fue 50 % forraje y 50 % concentrado, incluyendo algún subproducto de cervecería en el concentrado, desde 32.5 hasta 100 g kg⁻¹ de materia seca.

La inclusión de subproductos de cervecería mejora el rendimiento de la leche sin afectar el contenido de grasa, proteína y lactosa, lo que se atribuye a los aminoácidos que estos ingredientes pueden aportar a la dieta, como metionina y lisina, aminoácidos limitantes para la producción (Schwab et al., 1976). Algunos autores como Imaizumi et al. (2015), Faccenda et al. (2017) y Murdock et al. (1981) atribuyen este aumento a los aminoácidos, especialmente metionina, ligado a una mayor proteína no degradable en rumen. En concordancia, Miyazawa et al. (2007) mencionan que podría deberse a la mayor cantidad de ácido acético ruminal en vacas alimentadas con granos húmedos.

Por otra parte, en el presente estudio, el consumo de materia seca se vio disminuido. Al respecto, Firkins et al. (2002) mencionan que una de las razones puede ser la cinética de digestión más rápida.

Efecto de la inclusión de granos húmedos de cervecería sobre los parámetros de la fermentación ruminal *in vitro*

El pH a las 72 h se vio modificado por la inclusión de granos húmedos de cervecería, siendo menor con el tratamiento GHC30. Este resultado es similar al observado por Chiou et al. (1998) y se debió probablemente a un mayor contenido de fibra y una menor cantidad de carbohidratos disponibles, en comparación con los otros tratamientos. Por otra parte, los valores de pH observados en el presente estudio coinciden con los reportados por Seymour et al. (2005), quienes analizaron la relación entre los parámetros de la fermentación ruminal y la producción de leche

Con relación a la producción de gas, los tratamientos GHC0 y GHC15 presentaron mayor volumen máximo respecto a GHC30. Este incremento puede deberse probablemente a que los GHC estimulan el crecimiento de bacterias celulolíticas, las cuales sintetizan ácido acético como producto final de su fermentación (Mowrey et al., 1999).

Por el contrario, el tratamiento GHC30 presentó una menor producción de gas. Aún si no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la degradación de la materia seca o la materia orgánica, es importante destacar que esta degradación fue inferior en comparación con los otros dos tratamientos. Este resultado adquiere relevancia al considerar la técnica empleada, ya que según Theodorou et al. (1994), el volumen de gas producido está relacionado con la fermentación y la generación de ácidos grasos volátiles. Por lo tanto, una menor digestibilidad de la materia orgánica podría explicar la reducción en la producción de gas.

Por el contrario, el tratamiento GHC30 presentó una menor producción de gas. Aún si no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la degradación de la materia seca o la materia orgánica, es importante destacar que esta degradación fue inferior en comparación con los otros dos tratamientos. Este resultado adquiere relevancia al considerar la técnica empleada, ya que según Theodorou et al. (1994), el volumen de gas producido está relacionado con la fermentación y la generación de ácidos grasos volátiles. Por lo tanto, una menor

digestibilidad de la materia orgánica podría explicar la reducción en la producción de gas

Efecto de la inclusión de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas Holstein

El mayor rendimiento de leche en las vacas que recibieron 15 kg en BF de GHC, puede estar atribuido al contenido de proteína no degradable en rumen que aporta este ingrediente (Miyazawa et al., 2007; Murdock et al., 1981). Además, el NASEM (2021) muestra que el GHC contiene de 20 a 60 % más metionina que otros ingredientes fibrosos. La metionina generalmente es limitada en las dietas de vacas lecheras cuando la base principal de la dieta incluye ensilado de maíz, alfalfa y mezcla de gramíneas y leguminosas como fuente forrajera (NASEM, 2001; Schwab et al., 1976). Sin embargo, cuando en el presente estudio se alimentaron las vacas con 30 kg de GHC la producción de leche se vio afectada, probablemente por la mayor cantidad de proteína degradable en rumen (PDR que posee la dieta comparado con los otros tratamientos (NRC, 2001). En vacas en producción, un mayor contenido de PDR en las dietas tiene como consecuencia un gasto energético adicional utilizado para metabolizar amoníaco y excretar nitrógeno en orina, reduciendo la energía disponible para la lactancia (Broderick, 2003). Además, un exceso de amoníaco en el rumen reduce la capacidad de los microorganismos ruminales para digerir la fibra de los alimentos (NRC, 2001). Por otro lado, el GHC contiene alrededor de 493 g kg⁻¹ MS de FDN, componente que limita el consumo de materia seca y reduce la tasa de pasaje (Mertens, 1997; NASEM, 2021). Los resultados obtenidos coinciden con Belibasakis y Tsirgogianni (1996), quienes incrementaron la producción de leche en 3.1 kg al día por vaca con la inclusión de 16 % de GHC en la dieta, como sustituto de ensilado de maíz, salvado de trigo y pasta de soya. Aunque en menor medida, Chiou et al. (1998) también obtuvieron un incremento de 0.68 kg de leche al día, con la inclusión de 10 % de GHC en la dieta de vacas lecheras..

Los datos del presente estudio muestran que, durante los primeros tres muestreos, no se observaron diferencias significativas en la cantidad de proteína en leche entre

el grupo alimentado con GHC0 y GHC15, siendo distinto únicamente con GHC30. Sin embargo, a partir del cuarto muestreo, los animales que recibieron GHC30 mostraron un aumento notable en la producción de proteína en leche. Esta respuesta podría estar relacionada con el metabolismo y aprovechamiento de los nutrientes de la dieta por parte del animal. Aunque los procesos metabólicos de síntesis de proteína, lactosa y sólidos no grasos son distintos, su regulación está asociada a la disponibilidad de nutrientes, la cual depende de factores hormonales modulados por la genética. En este contexto, la dieta ofrecida tuvo un efecto menor en el porcentaje de proteína en leche, siempre que los niveles se mantuvieran dentro de los rangos conocidos para la raza Holstein (3 - 3.5 %). Así mismo, los cambios más significativos en la composición de la leche, como la proteína, están relacionados con factores genéticos, mientras que componentes como la lactosa tienden a permanecer más constantes (Linn, 1988)

La modificación en la producción láctea y reducción de los componentes mayoritarios en la leche de las vacas alimentadas con GHC30 puede deberse al incremento en la producción láctea, ya que demanda mayor cantidad de nutrientes (Galvis et al., 2005). Además, la reducción en el rendimiento de proteína, lactosa y sólidos no grasos en las vacas alimentadas con GHC30, comparadas con las vacas de los otros tratamientos, puede ser consecuencia de un aporte mayor de FDN y una menor cantidad de almidón, afectando la producción de glucosa por modificación de la proporción de AGV; La glucosa es una molécula muy importante para la síntesis de lactosa (Broderick, 2003). Por otro lado, el incremento de aminoácidos en la dieta puede estimular la síntesis de α -lactoalbumina, proteína importante del suero y, con ello, se afectaría la producción de lactosa debido a que la α -lactoalbumina es un constituyente del complejo lactosa sintetasa en glándula mamaria. La lactosa posee capacidad osmótica y esto influye directamente en la producción de leche. Su concentración en la leche es relativamente constante y debido a su propiedad osmótica, favorece la retención de agua, lo que incrementa el volumen total producido. Así, un aumento en la concentración de lactosa en la leche se traduce en un incremento en la producción de leche (DePeters y Cant, 1992). Esto explicaría porque las vacas alimentadas con los tratamientos GHC15 y

GHC0 presentan una mayor producción de leche y rendimiento de lactosa, en cambio, las que consumieron GHC30 mostraron menor producción y rendimiento de lactosa. Seymour et al. (2005) muestra la influencia del pH ruminal sobre la proteína en leche, de manera que esta se ve disminuida conforme el pH se va alcalinizando. Si bien en la fase *in vivo* no se midió el pH, el pH *in vitro* si mostro una diferencia ligeramente alcalina al incluir 30 kg de GHC. Wattiaux (2015b) menciona que, para incrementar la producción lechera, es importante la suplementación con PNDR como fuente de aminoácidos, ya que la producción de proteína microbiana en el rumen puede verse limitada. Los granos húmedos de cervecería pueden ser una fuente adicional de PNDR. Sin embargo, con un aumento en la disponibilidad de aminoácidos, la síntesis de proteína láctea también se incrementa, lo que podría descompensar la energía disponible.

Análisis de costos

En el presente estudio, los ingresos se mejoraron con la inclusión de GHC en la dieta de vacas en producción. Este resultado difiere con los obtenidos por West (1981), cuya ganancia sobre el costo de alimentación fue mayor entre los grupos experimentales de GHC, siendo el de mayor inclusión el de más ganancia, aunque es importante destacar que el porcentaje de inclusión de GHC era menor. Los ingresos (considerando el costo de la dieta), en función de la ingesta y la producción de leche, son más precisos, ya que las vacas no experimentaron pérdida de peso corporal para sostener la producción láctea.

XI. CONCLUSIONES

- De acuerdo con el metaanálisis realizado, se concluye que, la inclusión de subproductos de cervecería en la dieta de vacas en producción incrementa el rendimiento lechero, sin modificar el contenido de grasa, proteína y lactosa, ni el consumo de materia seca.
- En cuanto a la prueba *in vitro*, la inclusión de 15 kg de granos húmedos de cervecería no modifica la producción de gas total respecto al tratamiento control, pero la inclusión de 30 kg reduce la producción de gas total.
- Finalmente, la inclusión *in vivo* de 15.32 kg en base fresca de granos húmedos de cervecería en la dieta de vacas en lactación mejora el comportamiento productivo, sin afectar el contenido de grasa, proteína, lactosa y sólidos no grasos, pero incrementa la rentabilidad de la actividad.

XII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Agudelo, D. A., y Bedoya, O. B. (2005). Composición nutricional de la leche de ganado vacuno. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 38-42.
- American Association of Feed Control Officials. (2023). Chapter Six Official Feed Terms, Common or Usual Ingredient Names and Ingredient Definitions. En R. T. Eyck (Ed.), *A guide to submitting ingredient definition to AAFCO*.
- Angeles-Hernandez, J. C., Pollott, G., Albarran-Portillo, B., Ramírez-Perez, A. H., Lizarazo-Chaparro, A., Castelan Ortega, O. A., y Gonzalez Ronquillo, M. (2018). The application of a mechanistic model to analyze the factors that affect the lactation curve parameters of dairy sheep in Mexico. *Small Ruminant Research*, 164, 58-63. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2018.05.003>
- Angeles-Hernandez, J. C., Vieyra Alberto, R., Kebreab, E., Appuhamy, J. A. D. R. N., Dougherty, H. C., Castelan-Ortega, O., y Gonzalez-Ronquillo, M. (2020). Effect of forage to concentrate ratio and fat supplementation on milk composition in dairy sheep: A meta-analysis. *Livestock Science*, 238, 104069. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104069>
- Angulo, J., y Olivera, M. (2007). Fisiología de la producción láctea en bovinos: Involución de la glándula mamaria, lactogénesis, galactopoyesis, y eyección de la leche. *Fondo Editorial Biogénesis*, 143-151.
- AOAC international. (2012). *Official methods of analysis of AOAC International* (19th ed). AOAC International.
- Appuhamy, J. A. D. R. N., Strathe, A. B., Jayasundara, S., Wagner-Riddle, C., Dijkstra, J., France, J., y Kebreab, E. (2013). Anti-methanogenic effects of monensin in dairy and beef cattle: A meta-analysis. *Journal of Dairy Science*, 96(8), 5161-5173. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5923>
- Bauman, D. E., Baumgard, L. H., y Corl, B. A. (1999). *Biosíntesis del ácido linoleico conjugado en rumiantes*.
- Bauman, D. E., Lock, A. L., Fox, P. F., y McSweeney, P. L. H. (2006). Conjugated Linoleic Acid: Biosynthesis and Nutritional Significance. En *Advanced Dairy Chemistry: Vol. 2 Lipids* (era, pp. 93-136). Springer, Boston, MA.
- Belibasakis, N. G., y Tsiroggianni, D. (1996). Effects of wet brewers grains on milk yield, milk composition and blood components of dairy cows in hot weather. *Animal Feed Science and Technology*, 57(3), 175-181. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(95\)00860-8](https://doi.org/10.1016/0377-8401(95)00860-8)
- Broderick, G. A. (2003). Effects of Varying Dietary Protein and Energy Levels on the Production of Lactating Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 86(4), 1370-1381. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73721-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73721-7)
- Chiou, P. W.-S., Chen, C.-R., Chen, K.-J., y Yu, B. (1998). Wet brewers' grains or bean curd pomace as partial replacement of soybean meal for lactating cows. *Animal Feed Science and Technology*, 74(2), 123-134. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(98\)00170-9](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(98)00170-9)
- Church, D. C., Pond, W. G., y Pond, K. R. (2002). Nutrición y alimentación de animales. *Editorial Limusa SA México DF*.

- Contreras, P. A., y Noro, M. (2010). *Rumen: Morfofisiología, trastornos y modulación de la actividad fermentativa* (3a ed.). América Ltda.
- Davis, C. L., Grenawalt, D. A., y McCoy, G. C. (1983). Feeding Value of Pressed Brewers' Grains for Lactating Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 66(1), 73-79. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(83\)81755-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(83)81755-X)
- DePeters, E. J., y Cant, J. P. (1992). Nutritional Factors Influencing the Nitrogen Composition of Bovine Milk: A Review. *Journal of Dairy Science*, 75(8), 2043-2070. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(92\)77964-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(92)77964-8)
- DerSimonian, R., y Laird, N. (2015). Meta-analysis in clinical trials revisited. *Contemporary Clinical Trials*, 45(Pt A), 139-145. <https://doi.org/10.1016/j.cct.2015.09.002>
- Dhiman, T. R., Bingham, H. R., y Radloff, H. D. (2003). Production Response of Lactating Cows Fed Dried Versus Wet Brewers' Grain in Diets with Similar Dry Matter Content,. *Journal of Dairy Science*, 86(9), 2914-2921. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73888-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73888-0)
- Eussen, S. J. P. M., Van Dongen, M. C. J. M., Wijckmans, N., Den Biggelaar, L., Oude Elferink, S. J. W. H., Singh-Povel, C. M., Schram, M. T., Sep, S. J. S., Van Der Kallen, C. J., Koster, A., Schaper, N., Henry, R. M. A., Stehouwer, C. D. A., y Dagnelie, P. C. (2016). Consumption of dairy foods in relation to impaired glucose metabolism and type 2 diabetes mellitus: The Maastricht Study. *British Journal of Nutrition*, 115(8), 1453-1461. <https://doi.org/10.1017/S0007114516000313>
- Faccenda, A., Zambom, M. A., Castagnara, D. D., Avila, A. S. D., Fernandes, T., Eckstein, E. I., Anschau, F. A., y Schneider, C. R. (2017). Use of dried brewers' grains instead of soybean meal to feed lactating cows. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 46(1), 39-46. <https://doi.org/10.1590/s1806-92902017000100007>
- FAO. (2024). *Calidad y evaluación*. Dairy Production Products. <https://www.fao.org/dairy-production-products/products/quality-and-testing/es>
- Firkins, J. L., Harvatine, D. I., Sylvester, J. T., y Eastridge, M. L. (2002). Lactation Performance by Dairy Cows Fed Wet Brewers Grains or Whole Cottonseed to Replace Forage,. *Journal of Dairy Science*, 85(10), 2662-2668. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74351-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74351-8)
- Fox, P. F. (2000). *Fundamentals of Cheese Science*. Springer Science y Business Media.
- France, J., y Dijkstra, J. (2005). Volatile Fatty Acid Production. En *Quantitative aspects of ruminant digestion and metabolism* (2nd ed.). CABI. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/9780851998145.0157>
- Galvis, R. D., Múnera, E. A., y Marín, A. M. (2005). Relación entre el mérito genético para la producción de leche y el desempeño metabólico y reproductivo en la vaca de alta producción. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 18(3), 228-239.
- García, C. A. C., Montiel, R. L. A., y Borderas, T. F. (2014). Grasa y proteína de la leche de vaca: Componentes, síntesis y modificación. *Archivos de Zootecnia*, 63(241), 85-105. <https://doi.org/10.21071/az.v63i241.592>
- Gasque, R., y Blanco, M. A. (2001). *Zootecnia de Bovinos Productores de Leche (R. Gasque y M.A. Blanco)* (z-lib).

- Gholami, F., Khoramdad, M., Esmailnasab, N., Moradi, G., Nouri, B., Safiri, S., y Alimohamadi, Y. (2017). The effect of dairy consumption on the prevention of cardiovascular diseases: A meta-analysis of prospective studies. *Journal of Cardiovascular and Thoracic Research*, 9(1), 1-11. <https://doi.org/10.15171/jcvtr.2017.01>
- Gómez-Cortés, P., De La Fuente, M. Á., y Juárez, M. (2019). Ácidos grasos trans y ácido linoleico conjugado en alimentos: Origen y propiedades biológicas. *Nutrición Hospitalaria*. <https://doi.org/10.20960/nh.2466>
- Goulding, D. A., Fox, P. F., y O'Mahony, J. A. (2020). Milk proteins: An overview. En *Milk Proteins* (pp. 21-98). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815251-5.00002-5>
- Harper, K., Cornelisse, Kime, L. F., y Hyde, J. (2019, marzo). *Budgeting for Agricultural Decision Making*. <https://extension.psu.edu/budgeting-for-agricultural-decision-making>
- Hedges, L. V. (1981). Distribution Theory for Glass's Estimator of Effect Size and Related Estimators. *Journal of Educational Statistics*, 6(2), 107-128. <https://doi.org/10.2307/1164588>
- Higgins, J. P., Thompson, S. G., Deeks, J. J., y Altman, D. G. (2003). *Measuring inconsistency in meta-analyses*. 327, 557-560. <https://doi.org/10.1136/bmj.327.7414.557>
- Hill, D. L., y Wall, E. (2017). Weather influences feed intake and feed efficiency in a temperate climate. *Journal of Dairy Science*, 100(3), 2240-2257. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11047>
- Holstein Association USA. (2007). *Holstein: United States Registered Holsteins*.
- Imaizumi, H., Batistel, F., De Souza, J., y Santos, F. A. P. (2015). Replacing soybean meal for wet brewer's grains or urea on the performance of lactating dairy cows. *Tropical Animal Health and Production*, 47(5), 877-882. <https://doi.org/10.1007/s11250-015-0802-y>
- Kay, J. K., Phyn, C. V. C., Rius, A. G., Morgan, S. R., Grala, T. M., y Roche, J. R. (2013). Once-daily milking during a feed deficit decreases milk production but improves energy status in early lactating grazing dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 96(10), 6274-6284. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6167>
- Keown, J. F., Everett, R. W., Empet, N. B., y Wadell, L. H. (1986). Lactation Curves. *Journal of Dairy Science*, 69(3), 769-781.
- Klein, B. G. (2020). *Cunningham. Fisiología veterinaria* (Sexta edición). Elsevier.
- Linn, J. G. (1988). Factors Affecting the Composition of Milk from Dairy Cows. En National Research Council, *Designing Foods: Animal Product Options in the Marketplace*. National Academies Press (US). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK218193/>
- Livingstone, K. M., Lovegrove, J. A., Cockcroft, J. R., Elwood, P. C., Pickering, J. E., y Givens, D. I. (2013). Does Dairy Food Intake Predict Arterial Stiffness and Blood Pressure in Men?: Evidence from the Caerphilly Prospective Study. *Hypertension*, 61(1), 42-47. <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.111.00026>
- Macon, B., Sollenberger, L. E., Moore, J. E., Staples, C. R., Fike, J. H., y Portier, K. M. (2003). Comparison of three techniques for estimating the forage intake of lactating dairy cows on pasture. *Journal of Animal Science*, 81(9), 2357-2366. <https://doi.org/10.2527/2003.8192357x>
- Membrive. (2016). Anatomy and Physiology of the Rumen. En D. Millen, M. De Beni Arrigoni, y R. Lauritano Pacheco (Eds.), *Rumenology*. Springer, Cham.

- Mertens, D. R. (1997). Creating a System for Meeting the Fiber Requirements of Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 80(7), 1463-1481. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76075-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76075-2)
- Mertens, D. R. (2005). Rate and extent of digestion. En *Quantitative aspects of ruminant digestion and metabolism* (2nd ed.). CABI Books.
- Mirzaei, A., y Maheri-Sis, N. (2008). Nutritive Value of Some AgroIndustrial By-products for Ruminants—A Review. *World J. Zool.*, 3.
- Miyazawa, K., Sultana, H., Hirata, T., Kanda, S., y Itabashi, H. (2007). Effect of brewer's grain on rumen fermentation, milk production and milk composition in lactating dairy cows. *Animal Science Journal*, 78(5), 519-526. <https://doi.org/10.1111/j.1740-0929.2007.00471.x>
- Morales-Almaráz, E., Soldado, A., González, A., Martínez-Fernández, A., Domínguez-Vara, I., De La Roza-Delgado, B., y Vicente, F. (2010). Improving the fatty acid profile of dairy cow milk by combining grazing with feeding of total mixed ration. *Journal of Dairy Research*, 77(2), 225-230. <https://doi.org/10.1017/S002202991000004X>
- Mowrey, A., Eilersieck, M. R., y Spain, J. N. (1999). Effect of Fibrous By-Products on Production and Ruminal Fermentation in Lactating Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 82(12), 2709-2715. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(99\)75527-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(99)75527-X)
- Murdock, F. R., Hodgson, A. S., y Riley, R. E. (1981). Nutritive Value of Wet Brewers Grains for Lactating Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 64(9), 1826-1832. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(81\)82771-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(81)82771-3)
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). *Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Eighth Revised Edition* (p. 25806). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25806>
- National Research Council (Ed.). (2001). *Nutrient requirements of dairy cattle* (7th rev. ed). National Academy Press.
- Ossa, G., Torregroza, L., y Alvarado, L. (1997). Determinación de la curva de lactancia en vacas mestizas de un hato de doble propósito en la Región Caribe de Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 2(1), 54-57.
- Pendini, C. R. (2012). *Notas sobre producción de leche*. Sima. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/2579>
- Pereira, P. C. (2014). Milk nutritional composition and its role in human health. *Nutrition*, 30(6), 619-627. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2013.10.011>
- Plata-Pérez, G., Angeles-Hernandez, J. C., Morales-Almaráz, E., Del Razo-Rodríguez, O. E., López-González, F., Peláez-Acero, A., Campos-Montiel, R. G., Vargas-Bello-Pérez, E., y Vieyra-Alberto, R. (2022). Oilseed Supplementation Improves Milk Composition and Fatty Acid Profile of Cow Milk: A Meta-Analysis and Meta-Regression. *Animals*, 12(13), 1642. <https://doi.org/10.3390/ani12131642>
- Polan, C. E., Herrington, T. A., Wark, W. A., y Armentano, L. E. (1985). Milk Production Response to Diets Supplemented with Dried Brewers Grains, Wet Brewers Grains, or Soybean Meal. *Journal of Dairy Science*, 68(8), 2016-2026. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(85\)81063-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(85)81063-8)

- Pulido, R. (2010). Metabolismo ruminal de las proteínas. En M. Noro y C. Pedro A, *Rumen: Morfofisiología, trastornos y modulación de la actividad fermentativa* (3a ed., pp. 37-46). América Ltda.
- Relling, A. E., y Matioli, G. A. (2003). *Fisiología digestiva y metabólica de los rumiantes*. Editorial EDULP.
- Ruiz-López, F. D. J., Cortés-Hernández, J. G., Romano-Muñoz, J. L., Villaseñor-González, F., y García-Ruiz, A. (2024). Estudio de la Estructura y Diversidad genética de ganado Holstein del sistema familiar en México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 15(2), 249-266. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v15i2.6366>
- Salinas-Martínez, J. A., Posadas-Domínguez, R. R., Morales-Díaz, L. D., Rebollar-Rebollar, S., y Rojo-Rubio, R. (2020). Cost analysis and economic optimization of small-scale dairy production systems in Mexico. *Livestock Science*, 237, 104028. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104028>
- Sánchez-Otero, D., Ángeles-Hernández, J., Muñoz-Benítez, A., Del Razo-Rodríguez, O., y Palladino, R. (2024). *Efecto del grano de cervecería sobre el rendimiento y componentes químicos de la leche: Un metaanálisis*. Engormix. https://www.engormix.com/lecheria/subproductos-cebada-nutricion-bovina/efecto-grano-cerveceria-sobre_a53948/
- Schwab, C. G., Satter, L. D., y Clay, A. B. (1976). Response of Lactating Dairy Cows to Abomasal Infusion of Amino Acids. *Journal of Dairy Science*, 59(7), 1254-1270. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(76\)84354-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(76)84354-8)
- SERVICIO DE INFORMACIÓN AGROALIMENTARIA Y PESQUERA SIAP (Ed.). (2024). *Panorama Agroalimentario 2018-2024*. <https://online.pubhtml5.com/rsarc/ybnl/>
- Seymour, W. M., Campbell, D. R., y Johnson, Z. B. (2005). Relationships between rumen volatile fatty acid concentrations and milk production in dairy cows: A literature study. *Animal Feed Science and Technology*, 119(1), 155-169. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2004.10.001>
- Shahmirzadi, F. E., Ghavamzadeh, S., y Zamani, T. (2019). The Effect of Conjugated Linoleic Acid Supplementation on Body Composition, Serum Insulin and Leptin in Obese Adults. *Arch Iran Med*, 22(5), 255-261.
- Stelwagen, K. (2001). Effect of Milking Frequency on Mammary Functioning and Shape of the Lactation Curve. *Journal of Dairy Science*, 84, E204-E211. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(01\)70219-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)70219-6)
- Tamayo, C. (2007). Del rumen a la ubre. En *Buenas Prácticas de Producción Primaria de Leche* (pp. 153-161). <https://revistas.udea.edu.co/index.php/biogenesis/article/view/328085>
- Theodorou, M. K., Williams, B. A., Dhanoa, M. S., McAllan, A. B., y 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(3-4), 185-197. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(94\)90171-6](https://doi.org/10.1016/0377-8401(94)90171-6)
- Van Soest, P. J. (1994). *Nutritional ecology of the ruminant* (2nd ed). Comstock Pub.
- Van Soest, P. J., Robertson, J. B., y 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. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)

- Vieyra-Alberto, R., Arriaga Jordán, C. M., Domínguez Vara, I. A., Bórquez Gastelum, J. L., y Morales Almáraz, E. (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.
- Wattiaux, M. A. (2015a). Composición de la leche y valor nutricional. *Esenciales Lecheras*.
- Wattiaux, M. A. (2015b). Metabolismo de proteínas en las vacas lecheras. *Esenciales Lecheras*.
- Wattiaux, M. A. (2015c). Secreción de leche por la ubre de una vaca lechera. *Esenciales Lecheras*.
- Wattiaux, M. A., y Armentano, L. E. (2015). *Metabolismo de carbohidratos en vacas lecheras*.
- Wattiaux, M. A., y Grummer, R. R. (2015). *Metabolismo de lípidos en vacas lecheras*.
- West, J. W., Ely, L. O., y Martin, S. A. (1994). Wet Brewers Grains for Lactating Dairy Cows During Hot, Humid Weather. *Journal of Dairy Science*, 77(1), 196-204. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(94\)76942-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(94)76942-3)
- Westendorf, M. L., y Wohlt, J. E. (2002). Brewing by-products: Their use as animal feeds. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 18(2), 233-252. [https://doi.org/10.1016/S0749-0720\(02\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0749-0720(02)00016-6)
- Zavaleta de Lucio, E. (1976). Los ácidos grasos volátiles, Principal fuente de energía de los rumiantes. *Ciencia Veterinaria*, 1, 223-240.

XIII. ANEXOS

Resumen publicado en la Revista Argentina de Producción Animal

Sánchez-Otero D, Ángeles-Hernández JC, Muñoz-Benítez AL, Del Razo-Rodríguez OE, Palladino RA, Vieyra-Alberto R. 2023. Efecto del grano de cervecera sobre el rendimiento y componentes químicos de la leche: Un metaanálisis. *Revista Argentina de Producción Animal*. 43(1): 185-226.

NA 42 Efecto del grano de cervecera sobre el rendimiento y componentes químicos de la leche: Un metaanálisis

Sánchez-Otero D^{1,2}, Ángeles-Hernández JC^{3*}, Muñoz-Benítez AL², Del Razo-Rodríguez OE², Palladino RA³, Vieyra-Alberto R^{2*}
¹Maestría en Ciencias Zootécnicas y Salud Animal, ²Área Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Instituto de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ³CONICET, FIL, FCA-UNLZ.

*E-mail: rodolfo_vieyra@uah.edu.mx; juan_angeles@uah.edu.mx

Effect of brewer's grain on yield and production of milk chemical components: A metaanalysis

Introducción

Los subproductos cerveceros más utilizados para la alimentación animal son los residuos de granos que se utilizan para la producción de cerveza. Este residuo puede comercializarse directamente como grano de cervecera (GC) húmedo o seco (Dhiman *et al.*, 2003). Diversos estudios han mostrado el efecto positivo en el rendimiento de leche; sin embargo, la magnitud del efecto muestra una marcada variabilidad entre estudios. Por lo cual, el objetivo del presente trabajo es estimar el efecto global de la inclusión de GC en raciones de vacas lecheras sobre producción y composición química de la leche mediante una revisión sistematizada y metaanálisis.

Materiales y Métodos

Una búsqueda sistematizada de artículos científicos se llevó a cabo utilizando la siguiente pregunta PICO: En vacas lecheras (P: población) cual es el efecto de la inclusión de grano de cervecera (I: intervención) sobre la producción y composición química de la leche (O: outcomes) en comparación con raciones sin el subproducto (C: control) utilizando las siguientes bases electrónicas Google Scholar, Science direct, PubMed, Web of Science y Primo-UAEH.

Un total de 24 ensayos fueron incluidos en el presente metaanálisis, los cuales cumplieron con los siguientes criterios: 1) estudios publicados en revistas científicas internacionales; 2) ensayos con grupo testigo (sin adición de GC); 3) estudios con evidencia de aleatorización de los tratamientos; 4) ensayos que reportan el tamaño de muestra, la media y alguna medida de dispersión de los tratamientos.

Las variables respuesta analizadas fueron: rendimiento de leche (kg d⁻¹) contenido de grasa (%), de proteína (%) y de lactosa (%) en la leche y consumo de materia seca (kg d⁻¹). El paquete "meta" (Balduzzi *et al.* 2019) del programa R fue utilizado para llevar a cabo el presente metaanálisis. La heterogeneidad de los estudios fue cuantificada utilizando el índice I².

Resultados

La inclusión de GC en raciones de vacas tiene un efecto positivo sobre la producción de leche (DMS= +0,55; P= 0,004) con un incremento bruto de 0,89 kg d⁻¹ (P= 0,006). Sin embargo, la respuesta a la inclusión de GC en la producción láctea manifiesta una elevada heterogeneidad (P= 64; Fig. 1), por lo que es necesario explorar las fuentes de variabilidad entre estudios a través de una metaregresión. El contenido de grasa, proteína, lactosa y CMS no se vieron afectados por la inclusión de GC en las raciones (P> 0,05) (Tabla 1).

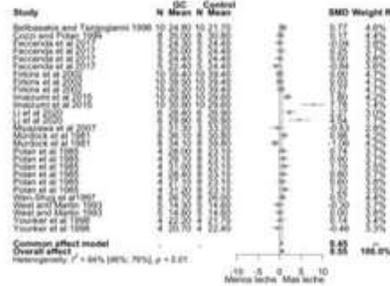


Figura 1. Efecto de la inclusión de granos de cervecera (GC) en raciones de vacas sobre la producción de leche

Conclusión

La inclusión de granos de cervecera en la dieta de vacas Holstein en estabulación mejora el rendimiento de leche sin afectar el contenido de grasa, proteína y lactosa.

Agradecimientos

Al CONAHCYT México, por la beca otorgada a la primera autora. A la UAHEH a través de la Maestría en Ciencias Zootécnicas y Salud Animal

Bibliografía

NASEM (2021). Nutrient requirements of dairy cattle. USA. Dhiman *et al.* (2003). *J. Dairy Sci.* 86(9), 2914-2921.

Tabla 1. Efecto de la inclusión de GC en dietas de vacas sobre el consumo, la producción y composición química de la leche

Ítem	n	DME [95 % CI]		p<	DMB [95 % CI]		Heterogeneidad	
		Media control (D.S.)	Modelo efectos aleatorios		Modelo efectos aleatorios	p<	I ² (%)	p<
Producción de leche (kg d ⁻¹)	27	26.78 (4.0)	+0.55 (0.17, 0.92)	0.004	+0.89 (0.25, 1.53)	0.006	64.3	0.001
Grasa (%)	26	3.75 (1.0)	-0.15 (-0.39, 0.07)	0.180	-0.14 (-0.31, 0.32)	0.110	42.8	0.010
Proteína (%)	24	3.27 (0.5)	+0.10 (0.12, 0.33)	0.370	+0.004 (-0.02, 0.03)	0.770	0.0	0.860
Lactosa (%)	11	4.61 (1.2)	+0.03 (-0.04, 0.12)	0.390	-0.003 (-0.086, 0.079)	0.930	0.0	0.990
CMS (kg d ⁻¹)	25	19.1 (1.9)	+0.42 (-0.44, 1.31)	0.330	+0.17 (-0.14, 0.50)	0.280	51.0	0.001

DME, diferencia media estandarizada; DMB, diferencia media bruta; CMS, consumo de materia seca.

Constancia de estancia en Fundación Instituto de la Leche, Argentina



Suipacha, noviembre de 2023

Ante quien corresponda:

Certificamos que la Med. Vet. Daniela Sánchez Otero ha participado del experimento "**Sistema endocannabinoide en vacas lecheras durante el periodo de transición**" el cual fue llevado a cabo en la Fundación Instituto de la Leche (Suipacha, Pov. de Buenos Aires, Argentina). El periodo de trabajo se extendió desde el 10/7/23 hasta el 8/11/23.

Aprovechamos la oportunidad para agradecer y felicitar a Daniela por su valiosa participación y excelente compromiso con la actividad desarrollada.

Sin más, saluda a ustedes cordialmente,

Vicente Diego Casarín

Presidente
FUNDACIÓN INSTITUTO DE LA LECHE

Ing. Agr. PhD. Alejandro Palladino
Director Académico

Libertad 1262 (1012) Buenos Aires – Argentina
Establecimiento "La Fermina"
Ruta Nacional Nº5 km 129,3 Suipacha, Pcia. Buenos Aires - Argentina
Tel. +54 11 5163-6003 +54 11 4440-1939
www.fil.org.ar - fil@fil.org.ar

Reconocimiento en el Área de Nutrición Animal, por resumen presentado en el congreso de la Asociación Argentina de Producción Animal, 2023



Constancia de presentación de trabajo AAPA



Septiembre 2023
13 – 14 – 15

AAPA
ASOCIACIÓN ARGENTINA
de PRODUCCIÓN ANIMAL

“Nos volvemos a juntar”

www.aapa.org.ar

----- Se certifica ante quien corresponda, que el resumen del trabajo de investigación que se detallan a continuación, ha sido presentado al 46° Congreso Argentino de Producción Animal, realizado los días 13 al 15 de septiembre de 2023, en la sección Nutrición y Alimentación Animal.

“EFECTO DEL GRANO DE CERVECERÍA SOBRE EL RENDIMIENTO Y COMPONENTES QUÍMICOS DE LA LECHE: UN METAANÁLISIS.”, cuyos autores son: SÁNCHEZ-OTERO D, ÁNGELES-HERNÁNDEZ JC, MUÑOZ-BENÍTEZ AL, DEL RAZO-RODRÍGUEZ OE, PALLADINO RA, VIEYRA-ALBERTO R

Balcarce, septiembre de 2023. -----

Andrea Pereira
Secretaria Administrativa

Constancia de presentación en el 7mo Coloquio de Investigación



El Centro Universitario UAEM Amecameca
El Programa en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales
y la Licenciatura en Medicina Veterinaria y Zootecnia

Otorgan la presente

Constancia

a: Sánchez OD*, Muñoz BAL, Del Razo ROE, Cárdenas CMA,
Hernández REA, Salinas MJA, Ángeles HJC, Vieyra AR
UAEM

Por su participación con la Ponencia:

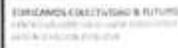
“RENDIMIENTO PRODUCTIVO Y VIABILIDAD ECONÓMICA DE GRANO HÚMEDO DE CERVECERÍA EN LA DIETA DE VACAS LECHERAS”

En el marco del 7° Foro Interdisciplinario de Investigación Científica 2024
Celebrado en el Auditorio Principal del Centro Universitario UAEM Amecameca
Amecameca, Méx., miércoles, 13 de noviembre de 2024

Patria, Ciencia y Tecnología
“2024, Conmemoración del 60 Aniversario de la Universidad Autónoma de México”



Dt. en C. y S. Miguel Ángel Salazar
Director del Centro Universitario UAEM Amecameca
CENTRO UNIVERSITARIO
UAEM AMECAMECA
DIRECCIÓN



Constancia de 3er encuentro de rumiantes, UNAM



Resumen publicado en plataforma ENGORMIX

Sánchez-Otero, D., Ángeles-Hernández, J., Muñoz-Benítez, A., Del Razo-Rodríguez, O., y Palladino, R. (2024, mayo 6). *Efecto del grano de cervecería sobre el rendimiento y componentes químicos de la leche: Un metaanálisis*. Engormix. https://www.engormix.com/lecheria/subproductos-cebada-nutricion-bovina/efecto-granos-cerveceria-sobre_a53948/

The screenshot displays the Engormix website interface. On the left is a navigation sidebar with icons for Inicio, Buscar, Explorar, Notificaciones, Mensajes, Publicar, and Perfil. The main content area features the article title "Efecto del grano de cervecería sobre el rendimiento y componentes químicos de la leche: Un metaanálisis" and its publication date. Below the title is the author information and the start of the "Introducción" section. On the right side, there are several promotional banners for partner companies (ADM, Evonik, Nutrex, FIGAP) and recommended links, including one for "Respuesta productiva y económica de una ración a base de pellet de cebada y..." and another for "FIGAP 2024 - Exposición Internacional". At the bottom right, there is a section for "Usuarios destacados en Lechería" featuring Rodrigo Ruiz, PhD from Cargill.

Difusión de video en perfil de AAPA, Instagram

Resumen destacado @aapa_argentina. (2023, Julio 7). Resumen destacado del 46° Congreso Argentino de Producción Animal, Pergamino, 2023. Sección Nutrición y alimentación animal. Efecto del grano de cervecera sobre el rendimiento y componentes químicos de la leche: Un meta-análisis. Daniela Sánchez-Otero, Med. Vet. estudiante de la Maestría en Ciencias Zootécnicas y Salud Animal, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. [video]. Instagram. <https://www.instagram.com/p/C9I6WpdvAdr/>



aapa_argentina
Audio original



aapa_argentina Resumen destacado del 46° Congreso Argentino de Producción Animal, Pergamino, 2023. Sección Nutrición y alimentación animal. Efecto del grano de cervecera sobre el rendimiento y componentes químicos de la leche: Un meta-análisis. Daniela Sánchez-Otero, Med. Vet. estudiante de la Maestría en Ciencias Zootécnicas y Salud Animal, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
#MECZYSA, #gispsu Icap #nutricionanimal
#animalnutrition #aapa

15 sem Ver traducción

Mención especial por la Asociación Argentina de Producción Animal

