



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y SERVICIO EN
ZOOTECNIA**

POSGRADO EN PRODUCCIÓN ANIMAL

**PROTEÍNA CRUDA EN LA DIETA Y EXCRECIÓN DE
NITRÓGENO EN LECHE, HECES Y ORINA, DE GANADO
LECHERO EN CONFINAMIENTO TOTAL O EN PASTOREO:
METAANÁLISIS**

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

Presenta:

NAHUN OMAR SANTIVÁÑEZ YAÑEZ

Bajo la supervisión de:

José Guadalupe García Muñiz, Ph.D.

Chapingo, Estado de México, junio de 2026.



APROBADA



**PROTEÍNA CRUDA EN LA DIETA Y EXCRECIÓN DE NITRÓGENO EN
LECHE, HECES Y ORINA, DE GANADO LECHERO EN CONFINAMIENTO
TOTAL O EN PASTOREO: METAANÁLISIS**

Tesis realizada por **NAHUN OMAR SANTIVÁÑEZ YAÑEZ**, bajo la supervisión
del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

DIRECTOR:



Ph.D. José Guadalupe García Muñiz

ASESOR:



Ph.D. Rodolfo Ramírez Valverde

ASESOR:



Dr. Ricardo Emmanuel Martínez Rocha

ASESOR:



Dr. Alejandro Lara Bueno

Contenido

LISTAS DE CUADROS.....	v
LISTAS DE FIGURAS.....	vi
DEDICATORIAS	viii
AGRADECIMIENTOS.....	ix
DATOS BIOGRÁFICOS.....	x
RESUMEN GENERAL.....	xi
GENERAL ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Hipótesis	2
1.2 Objetivo General	2
1.3 Objetivos particulares.....	2
1.4 Literatura citada	2
2. Revisión de literatura.....	4
2.1 Concepto de metaanálisis.....	4
2.2 Tipos de metaanálisis	4
2.2.1 Según el tipo de datos	4
2.2.2 Según el modelo estadístico	5
2.3 Proceso de un metaanálisis	5
2.3.1 Búsqueda de información científica	5
2.3.2 Criterios de inclusión y exclusión	6
2.3.3 Extracción y estandarización de datos.....	6

2.3.4	Construcción de la base de datos.....	7
2.4	Análisis estadístico en metaanálisis.....	7
2.4.1	Modelos de efectos fijos y aleatorios	7
2.4.2	Modelos de regresión (lineales y cuadráticos).....	8
2.4.3	Modelos de regresión aleatoria.....	9
2.5	Consideraciones metodológicas	9
2.5.1	PRISMA	9
2.5.2	Sesgo de publicación.....	11
2.5.3	Heterogeneidad de estudios	11
2.6	REFERENCIAS.....	11
3.	PROTEÍNA CRUDA EN LA DIETA Y EXCRECIÓN DE NITRÓGENO EN LECHE, HECES Y ORINA, DE GANADO LECHERO EN CONFINAMIENTO TOTAL O EN PASTOREO: METAANÁLISIS	14
3.1	RESUMEN	14
3.2	ABSTRACT	15
3.3	INTRODUCCIÓN	16
3.4	MATERIALES Y MÉTODOS	16
3.4.1	Estrategia de búsqueda bibliográfica y selección de estudios .	16
3.4.2	Extracción de datos	18
3.4.3	Análisis estadístico	23
3.5	RESULTADOS.....	24
3.5.1	Respuesta de la producción de leche y componentes al incremento de PC en la dieta	24

3.5.2	Composición de la leche en respuesta al contenido de PC en la dieta.....	29
3.5.3	Excreción de nitrógeno en leche, orina, heces y estiércol en respuesta al contenido de PC en la dieta.....	33
3.5.4	Eficiencia de uso del nitrógeno en respuesta al contenido de PC en la dieta.....	38
3.6	DISCUSIÓN	40
3.6.1	Respuesta de la producción de leche y componentes al incremento de PC en la dieta	40
3.6.2	Composición de la leche en respuesta al contenido de PC en la dieta.....	42
3.6.3	Excreción de nitrógeno en leche, orina, heces y estiércol en respuesta al contenido de PC en la dieta.....	43
3.6.4	Eficiencia de uso del nitrógeno en respuesta al contenido de PC en la dieta.....	45
3.7	CONCLUSIONES	46
3.8	AGRADECIMIENTOS	47
3.9	LITERATURA CITADA.....	47

LISTAS DE CUADROS

Cuadro 1. Estudios incluidos en el metaanálisis	18
Cuadro 2. Coeficientes de la regresión fija (error estándar) para la relación entre la proteína cruda (%) en la materia seca (MS) de la dieta y los rendimientos de leche (PL), grasa (PG), proteína (PP) y lactosa (PLac) de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total con ración totalmente mezclada (TMR) o en pastoreo, calculados con datos experimentales reportados en la literatura.	25
Cuadro 3. Coeficientes de la regresión fija (error estándar) para la relación entre el contenido de PC (%) en la materia seca (MS) de la dieta y los porcentajes de grasa (G%), proteína (P%) y lactosa (L%) en la leche de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total con ración totalmente mezclada (TMR) o en pastoreo, calculados con datos experimentales reportados en la literatura.	30
Cuadro 4. Coeficientes de la regresión fija (error estándar) para la relación entre el contenido de PC (%) en la materia seca (MS) de la dieta y los contenidos de nitrógeno en leche (NL), nitrógeno en orina (NO), nitrógeno en heces (NH) y nitrógeno total en estiércol (NE) de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total con ración totalmente mezclada (TMR) o en pastoreo, calculados con datos experimentales reportados en la literatura.....	34
Cuadro 5. Coeficiente de la regresión fija (error estándar) para la relación entre el contenido de PC (%) en la materia seca (MS) de la dieta y la eficiencia de uso del nitrógeno (%) de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total con ración totalmente mezclada (TMR) o en pastoreo, calculados con datos experimentales reportados en la literatura.	39

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA para la selección de estudios (adaptado de Page et al., 2021).....	10
Figura 2. Diagrama de flujo PRISMA que detalla la estrategia de búsqueda bibliográfica y el proceso de selección de estudios para el metaanálisis.....	17
Figura 3. Producción de leche (kg/vaca/d) como función del contenido de proteína cruda en la dieta de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.	26
Figura 4. Producción de grasa butírica (kg/vaca/d) como función del contenido de proteína cruda en la dieta de vacas lecheras manejadas en sistemas confinamiento total o en pastoreo.	27
Figura 5. Producción de proteína de leche (kg/vaca/d) como función del contenido de proteína cruda en la dieta de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.	28
Figura 6. Producción de lactosa (kg/vaca/d) como función del contenido de proteína cruda en la dieta de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.	29
Figura 7. Grasa butírica (%) en leche como función del contenido de proteína cruda en la dieta de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.	31
Figura 8. Proteína (%) en leche como función del contenido de proteína cruda en la dieta de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.	32
Figura 9. Lactosa (%) en leche como función del contenido de proteína cruda en la dieta de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.	33

Figura 10. Nitrógeno en leche (g/vaca/d) como función del contenido de proteína cruda en la dieta en vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.	35
Figura 11. Nitrógeno en orina (g/vaca/d) como función del contenido de proteína cruda en la dieta en vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.	36
Figura 12. Nitrógeno en heces (g/vaca/d) como función del contenido de proteína cruda en la dieta en vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.	37
Figura 13. Nitrógeno en estiércol (g/vaca/d) como función del contenido de proteína cruda en la dieta de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.	38
Figura 14. Eficiencia de uso del nitrógeno (%) como función del contenido de proteína cruda en la dieta en vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.	40

DEDICATORIAS

A mis padres,

Salvador Santivañez y Carlota Yañez,

Por ser el apoyo más firme a lo largo de mi vida académica y personal. Gracias por los valores inculcados, por el esfuerzo constante y por nunca dejar de creer en mí, incluso en los momentos más complejos de este proceso.

Finalmente,

Me dedico esta tesis a mí mismo, por la constancia, la disciplina y la resiliencia necesarias para concluir esta etapa, demostrando que incluso en la incertidumbre es posible avanzar y cumplir los objetivos propuestos.

AGRADECIMIENTOS

A Dios,

por permitirme vivir y cumplir uno de mis mayores anhelos: el conocimiento.

A mi *alma mater*, la Universidad Autónoma Chapingo,

por brindarme la oportunidad de continuar con mi formación profesional y académica.

A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)

por el apoyo económico otorgado para la realización y culminación de mis estudios de posgrado.

Al Departamento de Zootecnia,

por abrirme sus puertas y permitirme desarrollarme académicamente en su recinto.

Al Dr. José Guadalupe García Muñiz,

por su constante apoyo, confianza, dedicación, paciencia y acertada dirección de esta tesis, así como por la oportunidad brindada para el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Rodolfo Ramírez Valverde,

por sus valiosas observaciones, comentarios y aportaciones académicas que contribuyeron al fortalecimiento de este trabajo.

Gilberto y Beatriz,

Por el compañerismo, el apoyo constante y la amistad construida a lo largo de esta etapa académica, que hizo más llevadero cada reto del camino.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Nahun Omar Santivañez Yañez
Fecha de nacimiento	17 de diciembre de 1998
Lugar de nacimiento	Cuautla, Morelos
CURP	SAYN981217HMSNXH00
Profesión	Ingeniero Mecánico Agrícola

Desarrollo académico

Maestría en Ciencias (2024-2025)	Departamento de Zootecnia Posgrado en Producción Animal Universidad Autónoma Chapingo
Licenciatura (2019-2023)	Departamento Ingeniería Mecánica Agrícola Universidad Autónoma Chapingo

RESUMEN GENERAL

PROTEÍNA CRUDA EN LA DIETA Y EXCRECIÓN DE NITRÓGENO EN LECHE, HECES Y ORINA, DE GANADO LECHERO EN CONFINAMIENTO TOTAL O EN PASTOREO: METAANÁLISIS¹

Se recopilaron datos de ensayos de alimentación y balance de nitrógeno en ganado lechero con diferentes contenidos de proteína cruda (PC) en la dieta. La base de datos incluyó 47 artículos científicos de sistemas de confinamiento total con ración totalmente mezclada (TMR, $n = 28$) y pastoreo ($n = 19$). Se realizó un metaanálisis mediante modelos de regresión aleatoria para evaluar el efecto de la PC sobre la producción y composición de la leche, la excreción de nitrógeno y la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN). En pastoreo, las producciones de leche, grasa y proteína no fueron afectadas ($P > 0.05$) por el contenido de PC. En ambos sistemas, la producción de lactosa mostró un comportamiento cuadrático ($P < 0.05$), con máximos de 1.56 y 1.16 kg vaca⁻¹ d⁻¹ a 17.6 y 19.0% de PC en TMR y pastoreo, respectivamente. Sólo en TMR, las producciones de leche, grasa y proteína presentaron respuestas cuadráticas ($P < 0.05$), con máximos de 31.9, 1.18 y 1.009 kg vaca⁻¹ d⁻¹ a 17.8, 17.6 y 17.9% de PC, respectivamente. Los porcentajes de grasa y lactosa no fueron afectados ($P > 0.05$), mientras que el porcentaje de proteína aumentó ($P < 0.05$) sólo en TMR. El incremento de PC aumentó la excreción de nitrógeno y redujo la EUN en ambos sistemas, con mayores efectos en TMR, lo que sugiere mayor eficiencia del pastoreo en el uso del nitrógeno y menor impacto ambiental.

Palabras clave: proteína cruda, eficiencia de uso del nitrógeno, vacas lecheras, pastoreo, confinamiento total, metaanálisis.

¹ Tesis de Maestría en Ciencias en Innovación Ganadera, Posgrado en Producción Animal, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Nahun Omar Santivañez Yañez
Director de Tesis: José Guadalupe García Muñiz

GENERAL ABSTRACT

CRUDE PROTEIN IN THE DIET AND NITROGEN EXCRETION IN MILK, FECES AND URINE OF DAIRY CATTLE UNDER TOTAL CONFINEMENT OR GRAZING: META-ANALYSIS²

Data from feeding and nitrogen balance trials in dairy cattle with varying dietary crude protein (CP) levels were compiled. The database included 47 scientific articles from total mixed ration confinement systems (TMR, n = 28) and grazing systems (n = 19). A meta-analysis using random regression models was conducted to evaluate the effect of dietary CP on milk yield and composition, nitrogen excretion, and nitrogen use efficiency (NUE). In grazing systems, milk, fat, and protein yields were not affected ($P > 0.05$) by dietary CP. In both systems, lactose yield showed a quadratic response ($P < 0.05$), with maximum values of 1.56 and 1.16 kg cow⁻¹ d⁻¹ at 17.6 and 19.0% dietary CP in TMR and grazing systems, respectively. Only in TMR systems, milk, fat, and protein yields exhibited quadratic responses ($P < 0.05$), reaching maximum values of 31.9, 1.18, and 1.009 kg cow⁻¹ d⁻¹ at dietary CP levels of 17.8, 17.6, and 17.9%, respectively. Milk fat and lactose percentages were not affected ($P > 0.05$), whereas milk protein percentage increased ($P < 0.05$) only in TMR. Increasing dietary CP increased nitrogen excretion and reduced NUE in both systems, with greater effects in TMR, suggesting greater nitrogen utilization efficiency and lower environmental impact in grazing systems.

Keywords: crude protein, nitrogen use efficiency, dairy cows, grazing, total confinement, meta-analysis.

² Master Thesis in Livestock Innovation, Graduate Program in Animal Production, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Nahun Omar Santivañez Yañez

Advisor: José Guadalupe García Muñiz

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La proteína es uno de los componentes más caros en la alimentación del ganado lechero representando hasta 50% del costo total de la dieta (Imran et al., 2017). Por ello, cuando se incrementa el nivel de proteína cruda (PC) en el alimento, el costo por vaca por día también aumenta (Álvarez-Sánchez et al., 2023). Sin embargo, elevar el nivel de PC no siempre genera una respuesta productiva que justifique el aumento del costo de alimentación (Mirzaei-Alamouti et al., 2020). Además, en diversos estudios se ha reportado que incrementar el porcentaje de PC dietética no genera un aumento significativo en la producción de leche (PL) y sí en las concentraciones de nitrógeno (N) en excretas y orina (Doran et al., 2023; Katongole & Yan, 2020; Yang et al., 2022). No obstante, se han reportado incrementos en la PL a medida que se incrementa la PC en dieta (Doran et al., 2022). Lo cual sugiere que hay un nivel de PC dietario óptimo para incrementar la PL; sin embargo, proporcionar niveles mayores podría originar excedentes de N, lo que provoca problemas metabólicos y reproductivos. Este exceso de PC eleva las concentraciones de amoníaco y urea en la sangre, lo que puede alterar las hormonas esteroides y deteriorar la calidad de ovocitos y espermatozoides, reduciendo la fertilidad y afectando el desarrollo embrionario (Desta, 2024). Asimismo, las vacas desechan parte del N excedente a través de orina y heces, en forma de urea, generando contaminación por nitritos y nitratos (Elizondo et al., 2006). La respuesta a distintos niveles de PC puede variar entre sistema de confinamiento total y pastoreo, debido a diferencias en el manejo y la composición de la dieta. Diversos estudios han comparado la eficiencia de aprovechamiento de PC en sistemas de confinamiento total y vacas en pastoreo, y reportan diferencias en el consumo de materia seca, la producción de leche y la eficiencia en el uso de N, lo que sugiere que cada sistema puede responder de manera distinta a los niveles de PC ofrecidos en la dieta (Brito et al., 2022). Por tanto, conocer los niveles óptimos de PC según el tipo de sistema y la etapa de lactancia, puede contribuir a evitar sobrecostos, problemas metabólicos y reproductivos, así como reducir el impacto ambiental de la industria láctea.

1.1 Hipótesis

El incremento del nivel de proteína cruda en la dieta tiene un efecto significativo en la producción de leche, en su composición y la excreción de nitrógeno en vacas lecheras, presentando respuestas distintas entre sistemas de confinamiento total y pastoreo.

1.2 Objetivo General

- Evaluar el efecto del nivel de proteína cruda en la dieta sobre la producción de leche y componentes, la excreción de nitrógeno en leche, heces y orina en experimentos de ganado lechero en confinamiento total o en pastoreo.
- Estimar tasas promedio de cambio, máximos y mínimos de variables de producción de leche y componentes, y de emisión de nitrógeno al ambiente a través de heces y orina, en experimentos de ganado lechero en confinamiento total o en pastoreo.

1.3 Objetivos particulares

- Recopilar y sistematizar información de estudios experimentales que evalúen niveles de proteína cruda en dietas para ganado lechero.
- Estimar tasas promedio de cambio, máximos y mínimos de variables de producción de leche y componentes, y de emisión de nitrógeno al ambiente a través de heces y orina, en experimentos de ganado lechero en confinamiento total o en pastoreo.

1.4 Literatura citada

- Álvarez-Sánchez, A., García-Martínez, A., & Albarrán-Portillo, B. (2023). Productive and economic performance of Brown Swiss cows at different stages of lactation fed two crude protein levels. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 26(3), 070. <https://doi.org/10.56369/tsaes.4721>
- Brito, A. F., Almeida, K. V., & Oliveira, A. S. (2022). Production performance, nutrient use efficiency, and predicted enteric methane emissions in dairy cows under confinement or grazing management system. *Translational Animal Science*, 6(2), 1-8. <https://doi.org/10.1093/tas/txac028>
- Desta, A. G. (2024). The effect of crude protein and energy on conception of dairy cow: A review. *Discover Animals*, 1(1), 29. <https://doi.org/10.1007/s44338-024-00030-1>

- Doran, M. J., Mulligan, F. J., Lynch, M. B., Fahey, A. G., Markiewicz-Keszycka, M., Rajauria, G., & Pierce, K. M. (2023). Effects of protein supplementation strategy and genotype on milk production and nitrogen utilisation efficiency in late-lactation, spring-calving grazing dairy cows. *Animals*, 13(4), 570. <https://doi.org/10.3390/ani13040570>
- Doran, M. J., Mulligan, F. J., Lynch, M. B., Fahey, A. G., Ryan, N. J., McDonnell, C., McCabe, S., & Pierce, K. M. (2022). Effect of supplement crude protein concentration on milk production over the main grazing season and on nitrogen excretion in late-lactation grazing dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 105(1), 347–360. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20743>
- Elizondo S., J. (2006). El nitrógeno en los sistemas ganaderos de leche. *Agroonomía Mesoamericana*, 17(1), 69–77.
- Imran, M., Pasha, T. N., Shahid, M. Q., Babar, I., & Haque, M. N. (2017). Effect of increasing dietary metabolizable protein on nitrogen efficiency in Holstein dairy cows. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 30(5), 660–665. <https://doi.org/10.5713/ajas.16.0564>
- Katongole, C. B., & Yan, T. (2020). Effect of varying dietary crude protein level on feed intake, nutrient digestibility, milk production, and nitrogen use efficiency by lactating Holstein-Friesian cows. *Animals*, 10(12), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ani10122439>
- Mirzaei-Alamouti, H., Mohammad, A., Vazirigohar, M., Rezamand, P., & Mansouryar, M. (2020). Effect of protein level and grain source on milk production, nutrient digestibility and ruminal fermentation in primiparous Holstein cows. *Journal of Agricultural Science*, 158(8–9), 767–773. <https://doi.org/10.1017/S0021859621000095>
- Yang, C. T., Ferris, C. P., & Yan, T. (2022). Effects of dietary crude protein concentration on animal performance and nitrogen utilisation efficiency at different stages of lactation in Holstein-Friesian dairy cows. *Animal*, 16(7), 100562. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100562>

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Concepto de metaanálisis

El metaanálisis es una herramienta estadística que permite integrar y analizar de manera conjunta los resultados de múltiples estudios independientes que abordan una misma temática (Glass, 1976). Su objetivo principal es generar estimaciones más robustas y precisas que las obtenidas en estudios individuales, al incrementar el tamaño de muestra efectivo y reducir la variabilidad asociada a condiciones experimentales particulares (Fau & Nabzo, 2020). En este sentido, el metaanálisis no solo permite sintetizar la evidencia disponible, sino también identificar patrones de respuesta consistentes y cuantificar la magnitud de los efectos evaluados, lo cual resulta fundamental para fortalecer la toma de decisiones en investigación y sistemas de producción animal.

2.2 Tipos de metaanálisis

Los metaanálisis pueden clasificarse de acuerdo con distintos criterios, entre los que destacan el tipo de datos utilizados y el modelo estadístico empleado. En este sentido, se distinguen metaanálisis de datos agregados y de datos individuales, así como enfoques basados en modelos de efectos fijos y efectos aleatorios, los cuales difieren en la forma en que se considera la variabilidad entre estudios (Kelly & Kelly, 2012).

2.2.1 Según el tipo de datos

De acuerdo con el tipo de datos empleados, los metaanálisis pueden clasificarse en metaanálisis de datos agregados y metaanálisis de datos individuales. El metaanálisis de datos agregados se basa en la utilización de medidas de resúmenes reportados en los estudios primarios, como medias, proporciones o estimadores de efecto, las cuales son combinadas mediante técnicas estadísticas para obtener una estimación global. Este tipo de metaanálisis es el más común en la literatura, debido a la facilidad de acceso a la información publicada. Por otro lado, el metaanálisis de datos individuales implica la

recopilación de la información original a nivel de cada unidad experimental o individuo, lo que permite un análisis más detallado y flexible. Sin embargo, su aplicación es más limitada debido a la dificultad para obtener los datos originales de múltiples estudios (Escrig et al., 2020).

2.2.2 Según el modelo estadístico

De acuerdo con el modelo estadístico empleado, los metaanálisis se clasifican principalmente en modelos de efectos fijos y efectos aleatorios. El modelo de efectos fijos asume que todos los estudios comparten un mismo efecto verdadero, porque las diferencias observadas se deben únicamente al error muestral. En contraste, el modelo de efectos aleatorios considera que los efectos pueden variar entre estudios, increpando la variabilidad entre ellos dentro del análisis (Maitra, 2025).

La elección del modelo depende de la heterogeneidad entre los estudios y del objetivo del análisis, ya que el modelo de efectos aleatorios permite una mayor generalización de los resultados, mientras que el modelo de efectos fijos limita la inferencia a los estudios incluidos (McKenzie & Veroniki, 2024).

2.3 Proceso de un metaanálisis

El desarrollo de un metaanálisis comprende una serie de etapas sistemáticas orientadas a garantizar la validez, transparencia y reproductibilidad de los resultados. Estas etapas incluyen la búsqueda de información científica mediante criterios definidos, la selección de estudios a partir de criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos, así como la extracción, organización y síntesis de los datos para su posterior análisis estadístico (Borenstein et al., 2021).

2.3.1 Búsqueda de información científica

La búsqueda de información científica constituye la etapa inicial del metaanálisis y forma parte de la revisión sistemática, la cual incluye la definición de una estrategia de búsqueda, el uso de múltiples bases de datos y la selección de

estudios relevantes (Hernández et al., 2020). Para lo anterior, se emplean bases de datos especializadas, utilizando palabras clave y combinaciones de términos que permiten recuperar la información pertinente.

Esta etapa debe realizarse de manera sistemática y transparente, con el fin de minimizar sesgos y asegurar la inclusión de estudios representativos del área de estudio, considerando que la identificación, selección y localización de estudios depende de decisiones metodológicas que pueden introducir subjetividad en el proceso (Guzzo et al., 1987). Asimismo, es recomendable documentar el proceso de búsqueda, incluyendo las bases de datos utilizados, los criterios de búsqueda y el periodo considerado.

2.3.2 Criterios de inclusión y exclusión

Una vez identificados los estudios potencialmente relevantes, se establecen criterios de inclusión y exclusión que permiten seleccionar únicamente aquellos que cumplen con los objetivos del metaanálisis (Berkeljon & Baldwin, 2009). Estos criterios pueden considerar aspectos como el tipo de estudio, las características de los animales, las variables evaluadas, el diseño experimental y la disponibilidad de la información.

2.3.3 Extracción y estandarización de datos

La extracción de los datos consiste en recopilar de manera sistemática la información relevante de cada estudio seleccionando, incluyendo variables productivas, nutricionales y experimentales, de acuerdo con el enfoque del estudio (Gogtay & Thatte, 2017). Esta etapa es fundamental, ya que la precisión en la captura de los datos influye directamente en la calidad de los resultados obtenidos.

2.3.4 Construcción de la base de datos

Finalmente, la información recopilada y estandarizada se organiza en una base de datos estructurada, la cual constituye el insumo principal para el análisis estadístico del metaanálisis (Fau & Nabzo, 2020). En esta base de datos se integran todas las variables de interés, así como la identificación de los estudios y tratamientos evaluados.

Una adecuada construcción de la base de datos facilita el análisis posterior, permite la detección de posibles inconsistencias y asegura la correcta aplicación de los modelos estadísticos. En el ámbito de la producción animal, esta etapa es especialmente relevante debido a la variabilidad en las condiciones experimentales, lo que hace necesario un manejo cuidadoso de la información recopilada.

2.4 Análisis estadístico en metaanálisis

El análisis estadístico en un metaanálisis tiene como objetivo integrar la información proveniente de múltiples estudios independientes para obtener estimaciones más precisas y robustas de los efectos evaluados. Esta etapa permite cuantificar la magnitud de los efectos, así como identificar patrones de respuesta y consistencias entre estudios bajo diferentes condiciones experimentales (Hedges & Olkin, 1985).

Dado que los estudios incluidos suelen presentar variabilidad en cuanto a diseño experimental, condiciones de manejo, características de los animales y composición de las dietas, es necesario emplear modelos estadísticos que consideren dicha heterogeneidad. En este sentido, el uso de modelos apropiados permite separar la variabilidad atribuible a los tratamientos de aquella asociada a los estudios, mejorando la interpretación de los resultados obtenidos.

2.4.1 Modelos de efectos fijos y aleatorios

En el contexto del metaanálisis, los modelos de efectos fijos y aleatorios representan dos enfoques fundamentales para el análisis de los datos. El modelo

de efectos fijos asume que todos los estudios incluidos comparten un mismo efecto verdadero, por lo que las diferencias observadas entre ellos se deben únicamente al error muestral. Bajo este enfoque, las conclusiones se limitan estrictamente a los estudios analizados (Zhai & Guyatt, 2024).

Por otro lado, el modelo de efectos aleatorios considera que los efectos pueden variar entre estudios, debido a diferencias en condiciones experimentales, manejo o características de los animales. Este tipo de modelos incorpora una componente adicional de variabilidad entre estudios, lo que permite considerar la heterogeneidad presente en la información analizada (DerSimonian & Kacker, 2007). En consecuencia, su uso es más adecuado cuando existe variabilidad entre los trabajos incluidos.

2.4.2 Modelos de regresión (lineales y cuadráticos)

Los modelos de regresión permiten evaluar la relación entre variables, mediante la comparación entre valores observados y predichos, lo que facilita analizar el grado de ajuste y la respuesta del modelo (Hilborn & Mangel, 1997).

El modelo lineal describe la variable respuesta como una combinación lineal de las variables independientes, lo que implica una relación directa entre los predictores y la respuesta. Sin embargo, este tipo de modelos presenta limitación cuando la variable respuesta no cumple con ciertos supuestos, como la normalidad o continuidad, por lo que no siempre resulta adecuado para describir todos los tipos de datos (Faraway, 2010).

Por ello, el uso de modelos cuadráticos permite describir respuestas no lineales, incorporando términos que representan la curvatura de la variable respuesta. Estos modelos resultan necesarios cuando la relación entre las variables no puede ser adecuadamente representada por un modelo lineal, ya que permiten una mejor aproximación de la función que describe el comportamiento del sistema dentro del dominio experimental (Carlson & Carlson, 2009).

2.4.3 Modelos de regresión aleatoria

Los modelos de regresión aleatoria en metaanálisis pueden formularse dentro del marco de los modelos de efectos mixtos, lo cuales integran simultáneamente componentes fijos y aleatorios en una misma estructura analítica (Stram, 1996). Este enfoque generaliza los modelos tradicionales de efectos aleatorios, al permitir la incorporación de covariables a nivel de estudio que contribuyen a explicar la variabilidad observada. En este tipo de modelos, los efectos aleatorios representan la heterogeneidad existente entre estudios, asociada a diferencias en las condiciones experimentales y en las poblaciones evaluadas. De esta manera, se dispone de una estructura flexible que permite analizar de forma conjunta información proveniente de múltiples estudios, incorporando diversas fuentes de variación dentro del modelo.

2.5 Consideraciones metodológicas

El desarrollo de un metaanálisis requiere la aplicación de criterios metodológicos rigurosos que permitan garantizar la validez y reproductibilidad de los resultados (Escrig et al., 2020). Entre los principales aspectos a considerar se encuentran el uso de criterios explícitos y procedimientos sistemáticos para la selección de estudios (Page et al., 2021), la evaluación del sesgo de publicación (Sterne & Harbord, 2004) y el análisis de la heterogeneidad entre los trabajos incluidos (Higgins et al., 2003), los cuales influyen directamente en la confiabilidad de las conclusiones obtenidas.

2.5.1 PRISMA

El protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) es una guía diseñada para mejorar la transparencia, calidad e integridad en el reporte de revisiones sistemáticas y metaanálisis, la cual ha sido ampliamente utilizada por investigadores para la planificación, elaboración y publicación de este tipo estudios (Hutton et al., 2016). Su aplicación permite establecer un proceso transparente y reproducible en la recopilación de información, mediante la definición de criterios de inclusión y exclusión, así como

la documentación del flujo de selección de los estudios considerados (Page et al., 2021). En la Figura 1 se muestra un ejemplo de diagrama de flujo PRISMA, adaptado de la propuesta de PRISMA 20, el cual ilustra el proceso de identificación, selección y depuración de estudios en revisiones sistemáticas.

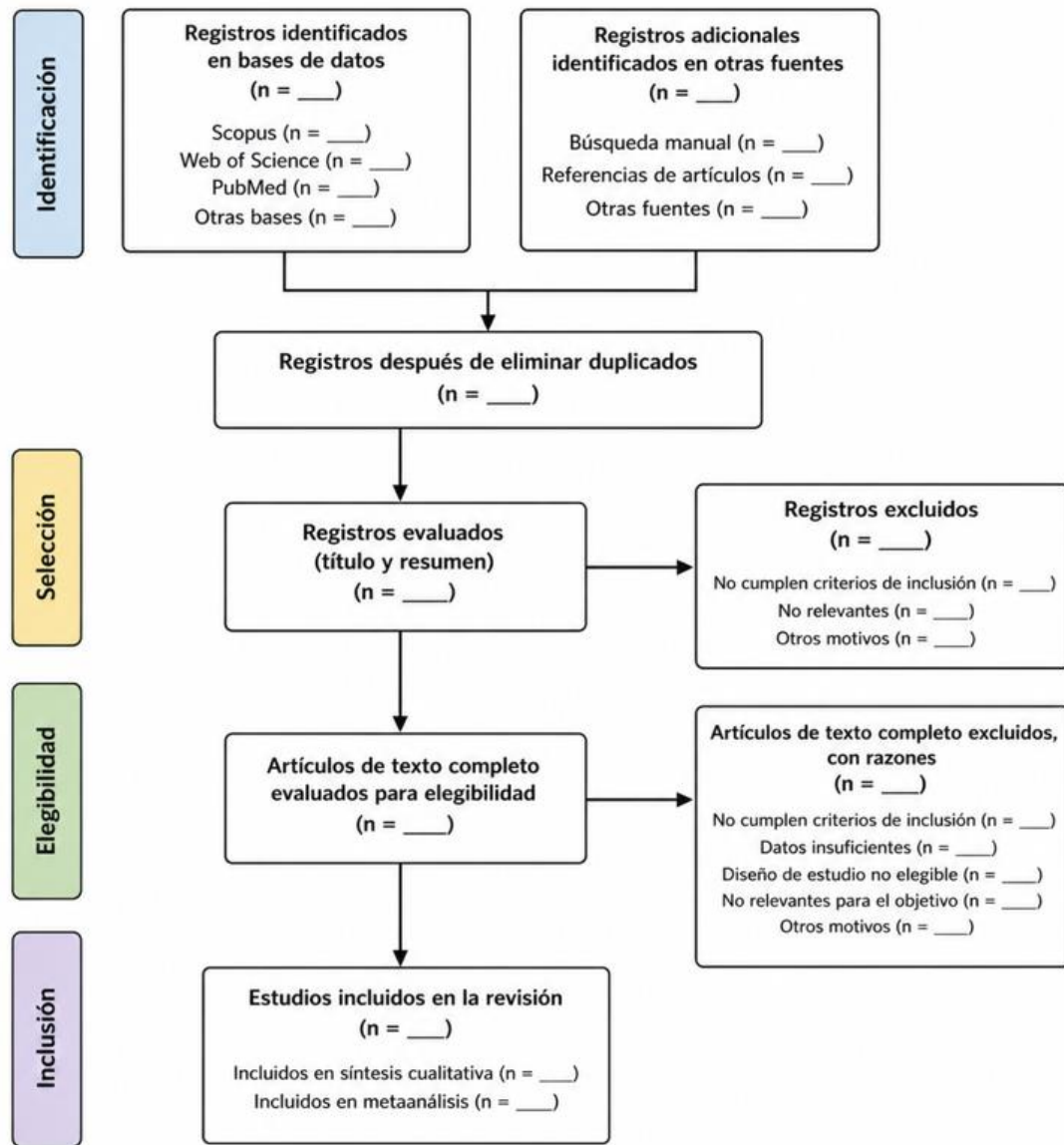


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA para la selección de estudios (adaptado de Page et al., 2021)

2.5.2 Sesgo de publicación

El sesgo de publicación se refiere a la tendencia de que la probabilidad de publicación de un estudio esté influenciada por sus resultados, de tal manera que aquellos con resultados estadísticamente significativos o favorables tienen mayor probabilidad de ser publicados que aquellos no significativos (Begg & Mazumdar, 1994). Esta situación puede generar una sobreestimación de los efectos analizados en el metaanálisis, por lo que su evaluación resulta esencial para evitar interpretaciones erróneas de los resultados (Duval & Tweedie, 2000).

2.5.3 Heterogeneidad de estudios

La heterogeneidad entre estudios representa una de las principales características del metaanálisis, ya que los trabajos incluidos pueden diferir en su diseño experimental, condiciones de manejo, características de los animales y variables evaluadas (Higgins et al., 2003). Esta variabilidad puede influir en la magnitud y dirección de los efectos estimados, por lo que su análisis permite determinar la consistencia de los resultados y seleccionar los modelos estadísticos más adecuados para su interpretación (Higgins & Thompson, 2002).

2.6 REFERENCIAS

- Berkeljon, A., & Baldwin, S. A. (2009). An introduction to meta-analysis for psychotherapy outcome research. *Psychotherapy Research*, 19(4–5), 511–518. <https://doi.org/10.1080/10503300802621172>
- Begg, C. B., & Mazumdar, M. (1994). Operating characteristics of a rank correlation test for publication bias. *Biometrics*, 50(4), 1088–1101.
- Borenstein, M., Hedges, L. V., Higgins, J. P. T., & Rothstein, H. R. (2021). *Introduction to Meta-Analysis* (Second Edition). Wiley.
- Carlson, R., & Carlson, J. E. (2009). The study of experimental factors. *Comprehensive Chemometrics: Chemical and Biochemical Data Analysis*, 301–343. Elsevier.
- DerSimonian, R., & Kacker, R. (2007). Random-effects model for meta-analysis of clinical trials: An update. *Contemporary Clinical Trials*, 28(2), 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.cct.2006.04.004>

- Duval, S., & Tweedie, R. (2000). Trim and fill: A simple funnel-plot-based method of testing and adjusting for publication bias in meta-analysis. *Biometrics*, 56(2), 455–463. <https://doi.org/10.1111/j.0006-341X.2000.00455.x>
- Escrig S., V. J., Lluca A., J. A., Granel V., L., & Bellver O., M. (2020). Metaanálisis: una forma básica de entender e interpretar su evidencia. *Revista de Senología y Patología Mamaria*, 34(1), 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.senol.2020.05.007>
- Faraway, J. J. (2010). *Generalized Linear Models*. International Encyclopedia of Education. Elsevier Ltd.
- Fau, C., & Nabzo, S. (2020). Metaanálisis: bases conceptuales, análisis e interpretación estadística. *Revista Mexicana de Oftalmología*, 94(6), 260–273. <https://doi.org/10.24875/RMO.M20000134>
- Glass, G. V. (1976). Primary, secondary, and meta-analysis of research. *Educational Researcher*, 5(10), 3–8.
- Gogtay, N. J., & Thatte, U. M. (2017). An introduction to meta-analysis. *Journal of the Association of Physicians of India*, 65(10), 78–85.
- Guzzo, R. A., Jackson, S. E., & Katzell, R. A. (1987). Meta-analysis analysis. *Research in Organizational Behavior*, 9, 407–442.
- Hedges, L. V., & Olkin, I. (1985). *Statistical Methods for Meta-Analysis*. Academic Press.
- Hernandez, A. V., Marti, K. M., & Roman, Y. M. (2020). Meta-Analysis. *Chest Journal*, 158(1S), S97–S102. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2020.03.003>
- Higgins, J. P. T., Thompson, S. G., Deeks, J. J., & Altman, D. G. (2003). Measuring inconsistency in meta-analyses. *BMJ*, 327(7414), 557–560. <https://doi.org/10.1136/bmj.327.7414.557>
- Higgins, J. P. T., & Thompson, S. G. (2002). Quantifying heterogeneity in a meta-analysis. *Statistics in Medicine*, 21(11), 1539–1558. <https://doi.org/10.1002/sim.1186>
- Hilborn, R., & Mangel, M. (1997). *The ecological detective: Confronting models with data*. Princeton University Press.
- Hutton, B., Catalá-López, F., & Moher, D. (2016). The PRISMA statement extension for systematic reviews incorporating network meta-analysis: PRISMA-NMA. *Medicina Clínica*, 147(6), 262–266. <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2016.02.025>
- Kelley, G. A., Kelley, K. S. (2012). Statistical models for meta-analysis: A brief tutorial. *World Journal of Methodology*, 2(4), 27–32. <http://dx.doi.org/10.4329/wjm.v2.i4.27>
- Maitra, S. (2025). Fixed-effect versus random-effect model in meta-analysis: ¿How to decide? *Indian Journal of Anaesthesia*, 69(1), 143–146. https://doi.org/10.4103/ija.ija_1203_24

- McKenzie, J. E., Veroniki, A. A. (2024). A brief note on the random-effects meta-analysis model and its relationship to other models. *Journal of Clinical Epidemiology*, 174, 111492. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2024.111492>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Sterne, J. A. C., & Harbord, R. M. (2004). Funnel plots in meta-analysis. *The Stata Journal*, 4(2), 127–141.
- Stram, D. O. (1996). Meta-analysis of published data using a linear mixed-effects model. *Biometrics*, 52(2), 536–544. <https://www.jstor.org/stable/2532893>
- Zhai, C., & Guyatt, G. (2024). Fixed-effect and random-effects models in meta-analysis. *Chinese Medical Journal*, 137(1), 1–4. <https://doi.org/10.1097/CM9.0000000000002814>

3. PROTEÍNA CRUDA EN LA DIETA Y EXCRECIÓN DE NITRÓGENO EN LECHE, HECES Y ORINA, DE GANADO LECHERO EN CONFINAMIENTO TOTAL O EN PASTOREO: METAANÁLISIS

Santivañez-Yañez Nahun Omar¹, García-Muñiz José Guadalupe¹, Lara-Bueno Alejandro¹, Ramírez-Valverde Rodolfo¹, Martínez-Rocha Ricardo Emmanuel¹.

¹Posgrado en Producción Animal, Departamento de Zootecnia, Universidad Autónoma Chapingo.

3.1 RESUMEN

Se recopilaron datos de ensayos de alimentación y balance de nitrógeno en ganado lechero, donde el contenido de proteína cruda (PC) en la dieta varió ampliamente. La base de datos se integró con la información de 47 artículos científicos que representaron los sistemas de confinamiento total con ración totalmente mezclada (TMR, $n = 28$) y el sistema de pastoreo ($n = 19$). Se efectuó un metaanálisis mediante modelos de regresión aleatoria para evaluar el efecto del contenido de PC en la dieta sobre la producción y composición de la leche, la excreción de nitrógeno en leche, orina, heces y estiércol, así como la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN). Para los ensayos de alimentación en pastoreo, las producciones diarias de leche, grasa y proteína no fueron afectadas ($P > 0.05$) por el contenido de PC en la dieta. La producción diaria de lactosa mostró un comportamiento cuadrático ($P < 0.05$) en ambos sistemas, con máximos de 1.56 y 1.16 kg vaca⁻¹ d⁻¹, a 17.6 y 19.0% de PC para TMR y pastoreo, respectivamente. En TMR, las producciones diarias de leche, grasa y proteína también desplegaron trayectorias cuadráticas ($P < 0.05$), alcanzado máximos de 31.9 kg de leche vaca⁻¹ d⁻¹ a 17.8% de PC; 1.18 kg de grasa vaca⁻¹ d⁻¹ a 17.6% de PC; y 1.009 kg de proteína vaca⁻¹ d⁻¹ a 17.9% de PC. En ambos sistemas, los porcentajes de grasa y lactosa no fueron afectados ($P > 0.05$) por el contenido de PC, mientras que el porcentaje de proteína en leche aumentó ($P < 0.05$) únicamente en TMR. El incremento del contenido de PC se asoció con aumentos significativos en la excreción de nitrógeno en ambos sistemas; sin embargo, las tasas fueron mayores ($P < 0.05$) en TMR, donde el nitrógeno en orina fue dos veces más alto, el nitrógeno en leche y heces tres veces superior, y el nitrógeno en estiércol casi cinco veces más alto respecto al pastoreo. La EUN disminuyó linealmente ($P < 0.05$) al aumentar el contenido de PC, con una reducción más pronunciada en TMR. Los resultados permitieron estimar niveles óptimos de PC para maximizar la producción diaria de leche, grasa, proteína y lactosa en TMR. Además, el incremento de PC aumentó la excreción de nitrógeno y redujo la EUN

en ambos sistemas, sugiriendo un mejor aprovechamiento del nitrógeno y menor impacto ambiental en pastoreo.

Palabras clave: proteína cruda, eficiencia de uso del nitrógeno, vacas lecheras, pastoreo, confinamiento total, metaanálisis.

3.2 ABSTRACT

Data were compiled from feeding and nitrogen balance trials in dairy cattle, in which dietary crude protein (CP) content varied widely. The database was assembled using information from 47 scientific articles representing total confinement systems with total mixed ration (TMR, $n = 28$) and grazing systems ($n = 19$). A meta-analysis was conducted using random regression models to evaluate the effect of dietary CP content on milk production and composition, nitrogen excretion in milk, urine, feces, and manure, as well as nitrogen use efficiency (NUE). In grazing feeding trials, daily milk, fat, and protein yields were not affected ($P > 0.05$) by dietary CP content. Daily lactose yield showed a quadratic response ($P < 0.05$) in both systems, with maximum values of 1.56 and 1.16 kg cow⁻¹ d⁻¹ at 17.6 and 19.0% dietary CP for TMR and grazing systems, respectively. In TMR, daily milk, fat, and protein yields also exhibited quadratic responses ($P < 0.05$), reaching maximum values of 31.9 kg milk cow⁻¹ d⁻¹ at 17.8% CP, 1.18 kg fat cow⁻¹ d⁻¹ at 17.6% CP, and 1.009 kg protein cow⁻¹ d⁻¹ at 17.9% CP. In both systems, milk fat and lactose percentages were not affected ($P > 0.05$) by dietary CP content, whereas milk protein percentage increased ($P < 0.05$) only in TMR. Increased dietary CP content was associated with significant increases in nitrogen excretion in both systems; however, excretion rates were greater ($P < 0.05$) in TMR, where urinary nitrogen was two times higher, milk and fecal nitrogen were three times greater, and manure nitrogen was nearly five times higher compared with grazing. Nitrogen use efficiency decreased linearly ($P < 0.05$) as dietary CP increased, with a more pronounced reduction in TMR. The results allowed estimation of optimal dietary CP levels to maximize daily milk, fat, protein, and lactose production in TMR. Furthermore, increasing dietary CP increased nitrogen excretion and reduced NUE in both systems, suggesting better nitrogen utilization and lower environmental impact in grazing systems.

Keywords: crude protein, nitrogen use efficiency, dairy cows, grazing, total confinement, meta-analysis.

3.3 INTRODUCCIÓN

La proteína es uno de los componentes más costosos en la alimentación del ganado lechero, representando hasta 50% del costo total de la dieta (Imran et al., 2017). Por ello, cuando se incrementa el nivel de PC en el alimento, el costo por vaca por día también aumenta (Álvarez-Sánchez et al., 2023). Sin embargo, elevar el nivel de PC no siempre genera una respuesta productiva que justifique el aumento en el costo de alimentación (Mirzaei-Alamouti et al., 2020). Además, en diversos estudios se ha reportado que incrementar el porcentaje de PC dietética no genera un aumento significativo en la producción de leche (PL) y sí en las concentraciones de nitrógeno (N) en heces y orina (Doran et al., 2023; Yang et al., 2022). No obstante, se han reportado incrementos en la PL a medida que se incrementa la PC en dieta (Doran et al., 2022), lo cual sugiere que hay un nivel de PC dietario óptimo para incrementar la PL; sin embargo, proporcionar niveles mayores podría originar excedentes de N, lo que resulta en problemas metabólicos y reproductivos. Así mismo, las vacas desechan parte del N excedente a través de orina y heces, en forma de urea, generando compuestos contaminantes como nitritos y nitratos (Elizondo et al., 2006). Por tanto, conocer los niveles óptimos de PC según el tipo de sistema y la etapa de lactancia, puede contribuir a evitar sobrecostos, problemas metabólicos y reproductivos, así como reducir el impacto ambiental de la industria láctea. El objetivo fue evaluar el efecto del nivel de PC en la dieta sobre la producción de leche y sus componentes, así como sobre la excreción de nitrógeno en leche, heces y orina, y la eficiencia del uso de nitrógeno (EUN), en vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Estrategia de búsqueda bibliográfica y selección de estudios

Este metaanálisis se desarrolló siguiendo las recomendaciones de la Declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [Moher et al., 2009], como se presenta en la Figura 2.

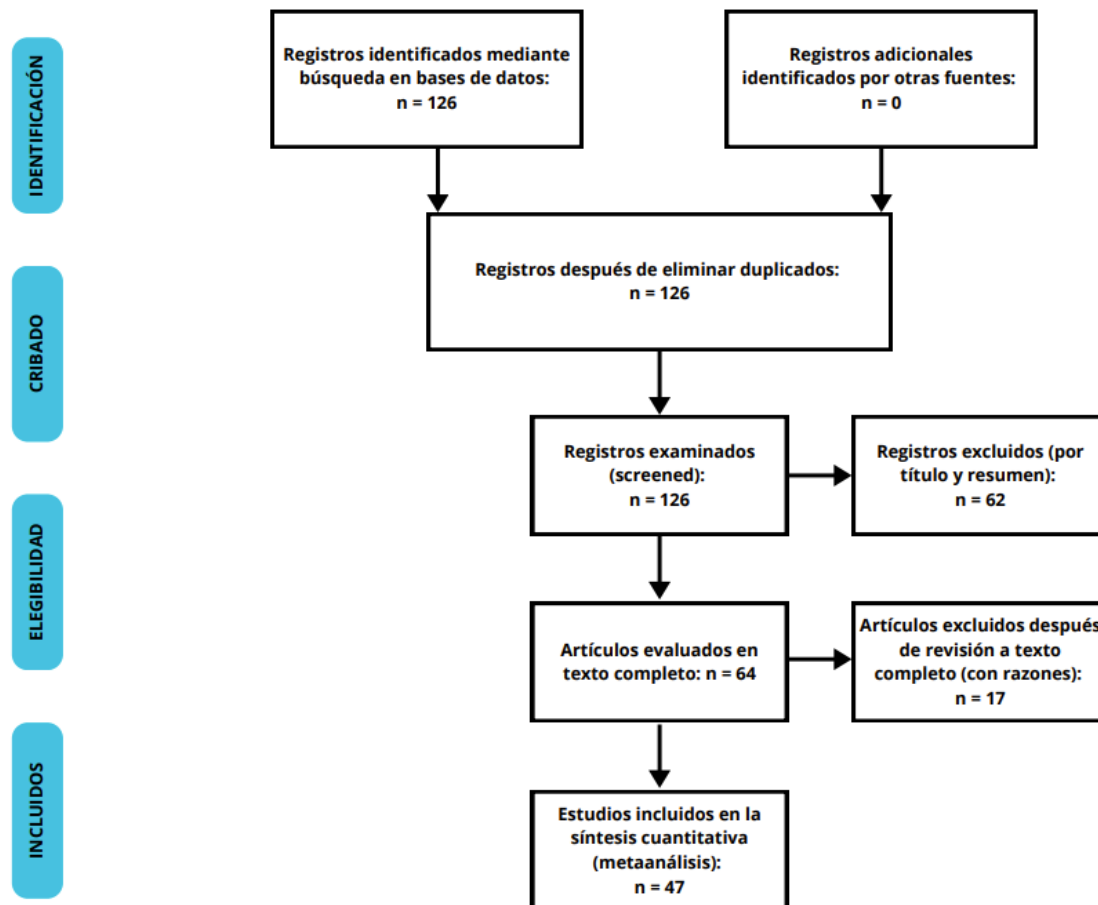


Figura 2. Diagrama de flujo PRISMA que detalla la estrategia de búsqueda bibliográfica y el proceso de selección de estudios para el metaanálisis.

Se realizó una búsqueda exhaustiva de literatura científica en bases de datos académicos en línea, incluyendo *Google Scholar*, *Scopus*, *PubMed*, *ScienceDirect* y *Scielo*, con el objetivo de identificar estudios experimentales que evaluaran el efecto del nivel de PC en la dieta sobre EUN, la producción de leche y excreción de nitrógeno en vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo. La estrategia de búsqueda incluyó combinaciones de palabras claves en español e inglés, empleando operadores *booleanos* tales como “vaca lechera”, “proteína cruda”, “eficiencia del nitrógeno”, “nitrógeno ureico en leche”, “excreción de nitrógeno”, “nitrógeno en orina y heces”, “confinamiento total”, “pastoreo”, “nitrogen utilization efficiency”, “milk urea nitrogen”, “urine nitrogen”, y “grazing system”. No se aplicaron restricciones

temporales ni geográficas con el fin de abarcar la mayor cantidad posible de estudios publicados sobre el tema. Adicionalmente, se revisaron tesis y artículos disponibles en repositorios institucionales que cumplieran con los criterios de calidad científica y diseño experimental requeridos. La selección de estudios se basó en la pertinencia temática, el tipo de animal evaluado y la calidad de la información reportada. Solo se consideraron trabajos realizados en vacas lecheras en lactancia, que incluyeron al menos tres dietas con diferentes niveles de PC y que reportan información suficiente sobre la composición de las dietas, la producción y composición de leche, o la excreción de nitrógeno en leche, heces y orina. A partir de esta búsqueda se identificaron 126 artículos potencialmente relevantes, los cuales fueron sometidos a un proceso de cribado que permitió eliminar duplicados y descartar estudios que no cumplieron con los criterios de inclusión. Finalmente, 47 artículos fueron considerados válidos y utilizados para conformar la base de datos del metaanálisis.

3.4.2 Extracción de datos

La información obtenida de los 47 estudios seleccionados se integró en una base de datos elaborada específicamente para este estudio (en la literatura citada se identifican con un asterisco). Cada estudio aportó una o más comparaciones entre distintas dietas con diferentes niveles de PC, tanto en sistemas de confinamiento total como en pastoreo. En algunos estudios, un mismo artículo reportó más de un experimento independiente; en dichos casos, los tratamientos fueron integrados a nivel de estudio en el Cuadro 1, mientras que cada experimento fue considerado como una unidad experimental independiente.

Cuadro 1. Estudios incluidos en el metaanálisis

Autor	País	Sistema	Nºtratamientos	Rango PC (%)
Roseler et al. (1993)	Estados Unidos	Confinamiento	5	12.20-17.60
Baker et al. (1995)	Estados Unidos	Confinamiento	4	14.30-17.50
Carruthers and Neil (1997)	Nueva Zelanda	Pastoreo	4	12.10-17.60

Kaufman and St. Pierre (2001)	Estados Unidos	Confinamiento	4	13.20-16.90
Frank and Swensson (2002)	Suecia	Pastoreo	5	13.10-17.00
Haig et al. (2002)	Canadá	Confinamiento	3	17.60-17.80
Broderick et al. (2003)	Estados Unidos	Confinamiento	3	15.13-18.40
Wattiaux and Karg (2004a)	Estados Unidos	Confinamiento	4	16.20-18.00
Wattiaux and Karg (2004b)	Estados Unidos	Confinamiento	4	16.40-18.00
Tas et al. (2005)	Países Bajos	Pastoreo	16	15.04-20.43
O'Donovan and Delaby (2005)	Irlanda	Pastoreo	8	19.50-21.20
Taweel et al. (2005)	Países Bajos	Pastoreo	4	15.10-16.20
Kalscheur et al. (2006)	Estados Unidos	Confinamiento	4	12.30-17.10
Olmos and Broderick (2006)	Estados Unidos	Confinamiento	5	13.50-19.40
Tas et al. (2006a)	Países Bajos	Pastoreo	8	17.50-21
Tas et al. (2006b)	Países Bajos	Pastoreo	12	15.04-20.40
Soder et al (2006)	Estados Unidos	Pastoreo	8	17.63-20.30
Burgos et al. (2007)	Estados Unidos	Confinamiento	4	15.10-20.70
Morrison and Patterson (2007)	Reino Unido	Pastoreo	6	17.31-24.50
Brito and Broderick (2007)	Estados Unidos	Confinamiento	4	16.50-16.60
Nadeau et al. (2007)	Suecia	Confinamiento	6	15.90-17.20
Humphreys et al. (2008)	Irlanda	Pastoreo	8	16.15-20.17
Cyriac et al. (2008)	Estados Unidos	Confinamiento	4	13.60-18.40
Broderick et al. (2008)	Estados Unidos	Confinamiento	8	14.80-18.60
Higgs et al. (2009)	Nueva Zelanda	Pastoreo	3	19.50-24.70
Pacheco et al. (2009)	Nueva Zelanda	Pastoreo	6	17.80-28.00
Burgos et al. (2010)	Estados Unidos	Confinamiento	4	15.10-20.70
Pacheco et al. (2010)	Nueva Zelanda	Pastoreo	8	21.70-24.10

Rius et al. (2010)	Estados Unidos	Confinamiento	4	15.20-19.10
María Belen Lazzarini (2010)	Nueva Zelanda	Pastoreo	8	17.90-23.90
Afzalzadeh et al. (2010)	Irlanda	Confinamiento	3	14.30-16.30
Rafieei et al. (2011)	Irlanda	Confinamiento	3	14.30-16.30
Colombini et al. (2012)	Italia	Confinamiento	3	16.00-17.00
Spek et al. (2012)	Países Bajos	Confinamiento	4	15.10-15.50
Whelan et al. (2012)	Irlanda	Pastoreo	4	14.85-17.99
Danes et al. (2013)	Brasil	Pastoreo	4	9.50-18.70
Higgs et al. (2013)	Nueva Zelanda	Pastoreo	5	23.00-28.10
Totty et al. (2013)	Nueva Zelanda	Pastoreo	3	23.70-26.30
Zhu et al. (2013)	China	Confinamiento	3	16.10-16.30
Hymes-Fetch et al. (2013)	Estados Unidos	Confinamiento	5	16.60-18.00
Arriola Apelo et al. (2014)	Estados Unidos	Confinamiento	8	15.02-16.88
Reid et al. (2015)	Irlanda	Pastoreo	4	10.10-30.20
Mutsvangwa et al. (2016)	Canadá	Confinamiento	4	14.90-17.50
Kidane et al. (2018)	Noruega	Confinamiento	4	11.82-16.67
Katongole and Yan (2020)	Irlanda	Confinamiento	4	14.10-20.10
Müller et al. (2021)	Alemania	Confinamiento	4	13.80-15.90
Yang et al. (2022)	Reino Unido	Confinamiento	3	11.40-17.30

Para cada tratamiento se recopilamos datos relacionados con la composición de la dieta, consumo de materia seca, respuesta productiva y variables asociadas al metabolismo y excreción del nitrógeno. Las variables se agruparon en tres categorías principales. La primera categoría correspondió a variables de producción que incluyeron: producción de leche, grasa, proteína y lactosa en leche, todas ellas registradas como rendimiento ($\text{kg vaca}^{-1} \text{ día}^{-1}$). Esta estructura permitió evaluar el efecto del nivel de PC dietaria sobre la cantidad total de

nutrientes producidos en la leche. La segunda categoría correspondió a variables de composición de la leche, dentro de las cuales se incluyeron la grasa butírica, proteína y lactosa, todas ellas expresadas como porcentaje en leche, lo que permitió analizar el efecto del nivel PC dietaría sobre la concentración de los principales componentes lácteos, independientemente de los cambios en el volumen de producción. La tercera categoría correspondió a variables ambientales asociadas al metabolismo del nitrógeno. Dentro de esta sección se recopilaron valores de nitrógeno en leche, nitrógeno en orina, nitrógeno en heces y nitrógeno en el estiércol, además de indicadores complementarios como el nitrógeno ureico en leche y la eficiencia del uso del nitrógeno. Todos los valores registrados fueron estandarizados en unidades comunes para garantizar su comparabilidad entre estudios. En los casos en que algún indicador no se encontró reportado explícitamente, se procedió a su cálculo mediante expresiones establecidas en la literatura y utilizadas de manera consistente en la base de datos del metaanálisis. Las ecuaciones empleadas fueron las siguientes:

$$\text{Consumo_ENL}_{\text{Mcalxvacaxdía}} = \text{ENL_Mcal}_{\text{kgMS}} * \text{CMS}_{\text{kgxvacaxdía}} \quad (1)$$

$$\text{Consumo_N}_{\text{gxvacaxdía}} = \frac{\left(\frac{\text{PC\%MS}}{100}\right) * \text{CMS}_{\text{kgxvacaxdía}} * 1000}{6.25} \quad (2)$$

$$\text{ConsumoN}_{\text{gxkgPV}} = \frac{\text{Consumo_N}_{\text{gxvacaxdía}}}{\text{PV}_{\text{kgxvaca}}} \quad (3)$$

$$\text{ConsumoN}_{\text{gxkgPV}} = \frac{\text{Consumo_N}_{\text{gxvacaxdía}}}{\text{PV}_{\text{kgxvaca}}^{0.75}} \quad (4)$$

$$\text{ConsumoN}_{\text{gx100kgPV}} = \frac{\text{Consumo_N}_{\text{gxvacaxdía}} * 100}{\text{PV}_{\text{kgxvaca}}} \quad (5)$$

$$\text{N_totalestiercol}_{\text{gxvacaxdía}} = \text{Orina_N}_{\text{gxvacaxdía}} + \text{Heces_N}_{\text{gxvacaxdía}} \quad (6)$$

$$Uleche_{mmolxL} = \frac{NUL_{mgxL}}{2.8} \quad (7)$$

$$Consumo_PC_{gxvacaxdía} = \left(\frac{PC\%MS}{100} \right) * CMS_{kgxvacaxdía} * 1000 \quad (8)$$

$$Consumo_PC_{gx100kgPV} = \frac{ConsumoPC_{gxvacaxdía} * 100}{PV_{kgxvaca}} \quad (9)$$

$$Consumo_PC_{gxkgpvxvacaxdía} = \frac{ConsumoPC_{gxvacaxdía}}{PV_{kgxvaca}^{0.75}} \quad (10)$$

$$Consumo_CNF_{gxvacaxdía} = \left(\frac{CNF\%MS}{100} \right) * CMS_{kgxvacaxdía} * 1000 \quad (11)$$

$$Consumo_CNF_{gxkgPVxvacaxdía} = \frac{Consumo_CNF_{gxvacaxdía}}{PV_{kgxvaca}^{0.75}} \quad (12)$$

$$Relación_CNF_PC_{gxg} = \frac{Consumo_CNF_{gxvacaxdía}}{Consumo_PC_{gxvacaxdía}} \quad (13)$$

$$Relación_PC_FDN = \frac{PC\%MS}{\left(\frac{FDN_{gxvacaxdía}}{10} \right)} \quad (14)$$

$$Producción_grasa_{kgxvacaxdía} = PL_{kgxvacaxdía} * \left(\frac{Grasa\%}{100} \right) \quad (15)$$

$$Producción_proteína_{kgxvacaxdía} = PL_{kgxvacaxdía} * \left(\frac{Proteína\%}{100} \right) \quad (16)$$

$$Proteína_verdadera = PL_{kgxvacaxdía} * \left(\frac{Proteína_verdadera\%}{100} \right) \quad (17)$$

$$Relación_proteína_grasa = \frac{Proteína\%}{Grasa\%} \quad (18)$$

$$kg_leche_kg_N_excretado = \frac{PL_{kgxvacaxdía}}{\frac{N_total_estiercol_{gxvacaxdía}}{1000}} \quad (19)$$

$$kg_leche_kg_CMS = \frac{PL_{kgxvacaxdía}}{CMS_{kgxvacaxdía}} \quad (20)$$

3.4.3 Análisis estadístico

De manera general, las variables analizadas se ajustaron mediante modelos de regresión aleatoria de la forma:

$$y_{ij} = \beta_{0i} + \beta_{1i}X_{ij} + \beta_{2i}X_{ij}^2 + \alpha_{0ij} + \alpha_{1ij}X_{ij} + e_{ij}$$

Donde:

i : Sistema de producción ($i, 1, \dots, 2$; confinamiento total o pastoreo).

j : Experimento o estudio de balance de nitrógeno ($j, 1, \dots, n$).

$\beta_{0i}, \beta_{1i}, \beta_{2i}$: Son, respectivamente, el intercepto, la pendiente lineal y la pendiente cuadrática de la regresión fija de la variable dependiente siendo modelada, sobre el porcentaje de proteína cruda en la dieta en el i -ésimo sistema de producción.

X_{ij}, X_{ij}^2 : Son, respectivamente, el porcentaje de proteína cruda en la dieta y el porcentaje de proteína cruda en la dieta al cuadrado, del j -ésimo experimento en el i -ésimo sistema de producción.

$\alpha_{0ij}, \alpha_{1ij}$: Son, respectivamente, el intercepto y la pendiente lineal de la regresión aleatoria del j -ésimo experimento en el i -ésimo sistema de producción.

$$\begin{pmatrix} \alpha_{0ij} \\ \alpha_{1ij} \end{pmatrix} \sim NIID \left[\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \sigma_{\alpha_0}^2 & \sigma_{\alpha_1\alpha_0} \\ \sigma_{\alpha_0\alpha_1} & \sigma_{\alpha_1}^2 \end{pmatrix} \right]$$

e_{ij} : Es el residual $\sim NIID(0, \sigma_e^2)$.

Dependiendo de la variable analizada, algunos términos del modelo general fueron excluidos cuando no resultaron estadísticamente significativos o cuando el modelo no fue convergente. En particular, las variables de producción se ajustaron considerando términos lineales y cuadráticos, mientras que las variables de composición de leche y algunas variables ambientales se modelaron únicamente con términos lineales. Asimismo, para ciertas variables se incluyó únicamente el intercepto aleatorio, mientras que en otras se incorporó tanto el intercepto como la pendiente aleatoria.

3.5 RESULTADOS

3.5.1 Respuesta de la producción de leche y componentes al incremento de PC en la dieta

En sistemas de pastoreo, el coeficiente lineal (β_{1i}) y cuadrático (β_{2i}) de la regresión fija para la producción de leche (PL), grasa (PG) y proteína (PP) no fueron significativos, indicando que el incremento de PC en la dieta no se asoció con cambios sistemáticos en las variables correspondientes. En contraste, en sistemas TMR, los coeficientes lineales positivos y cuadráticos negativos fueron significativos, lo que evidencia una respuesta cuadrática creciente a medida que se incrementó el nivel de PC en la dieta. La prueba de igualdad de coeficientes confirmó diferencias entre sistemas de producción para los términos lineal y cuadrático ($P < 0.01$) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Coeficientes de la regresión fija (error estándar) para la relación entre la proteína cruda (%) en la materia seca (MS) de la dieta y los rendimientos de leche (PL), grasa (PG), proteína (PP) y lactosa (PLac) de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total con ración totalmente mezclada (TMR) o en pastoreo, calculados con datos experimentales reportados en la literatura.

Variable ²	Sistema ³	Coeficientes (s.e) de la regresión fija ¹			Prueba de igualdad de los coeficientes de la regresión fija entre sistemas de producción (Pr > F)		
		β_0	β_1	β_2	β_0	β_1	β_2
PL	Pastoreo	21.3(3.5)****	0.284(0.28) ^{NS}	-0.007(0.01) ^{NS}	0.0192	0.0049	0.0067
	TMR	-4.8(10.5) ^{NS}	4.129(1.28)**	-0.116(0.04)**			
PG	Pastoreo	0.903(0.11)****	-0.005(0.010) ^{NS}	-0.0001(0.0003) ^{NS}	<.0001	<.0001	<.0001
	TMR	-0.363(0.29) ^{NS}	0.175(0.036)****	-0.005(0.0011)****			
PP	Pastoreo	0.740(0.11)****	0.004(0.014) ^{NS}	-8.0E ⁻⁵ (0.0004) ^{NS}	0.0062	0.0021	0.0032
	TMR	-0.315(0.36) ^{NS}	0.148(0.043)***	-0.0041(0.0013)**			
PLac	Pastoreo	0.347(0.18) ^{NS}	0.086(0.021)****	-0.0023(0.0006)****	0.1853	0.0407	0.0334
	TMR	-0.341(0.49) ^{NS}	0.216(0.059)***	-0.0062(0.0017)***			

¹ NS = no significativo; * = $P \leq 0.05$; ** = $P \leq 0.01$; *** = $P \leq 0.001$; **** = $P \leq 0.0001$.

² PL = producción de leche (kg vaca⁻¹ d⁻¹); PG = producción de grasa (kg vaca⁻¹ d⁻¹); PP = producción de proteína (kg vaca⁻¹ d⁻¹); PLac = producción de lactosa (kg vaca⁻¹ d⁻¹).

³ TMR = Ración mezclada completa.

En el sistema TMR, la producción de leche aumenta conforme se incrementa el contenido de PC hasta alcanzar un valor máximo aproximado de 31.9 kg vaca⁻¹ d⁻¹ a un nivel cercano a 17.8% de PC en la dieta, punto a partir del cual la producción comienza a declinar (Figura 3). Por otro lado, en pastoreo, la producción de leche se mantiene relativamente constante a lo largo del rango de PC evaluado, con valores promedio cercanos a 24-25 kg vaca⁻¹ d⁻¹, sin una tendencia clara al incremento o disminución conforme aumenta la PC. Este comportamiento es consistente con la ausencia de significancia estadística de los coeficientes del modelo para este sistema.

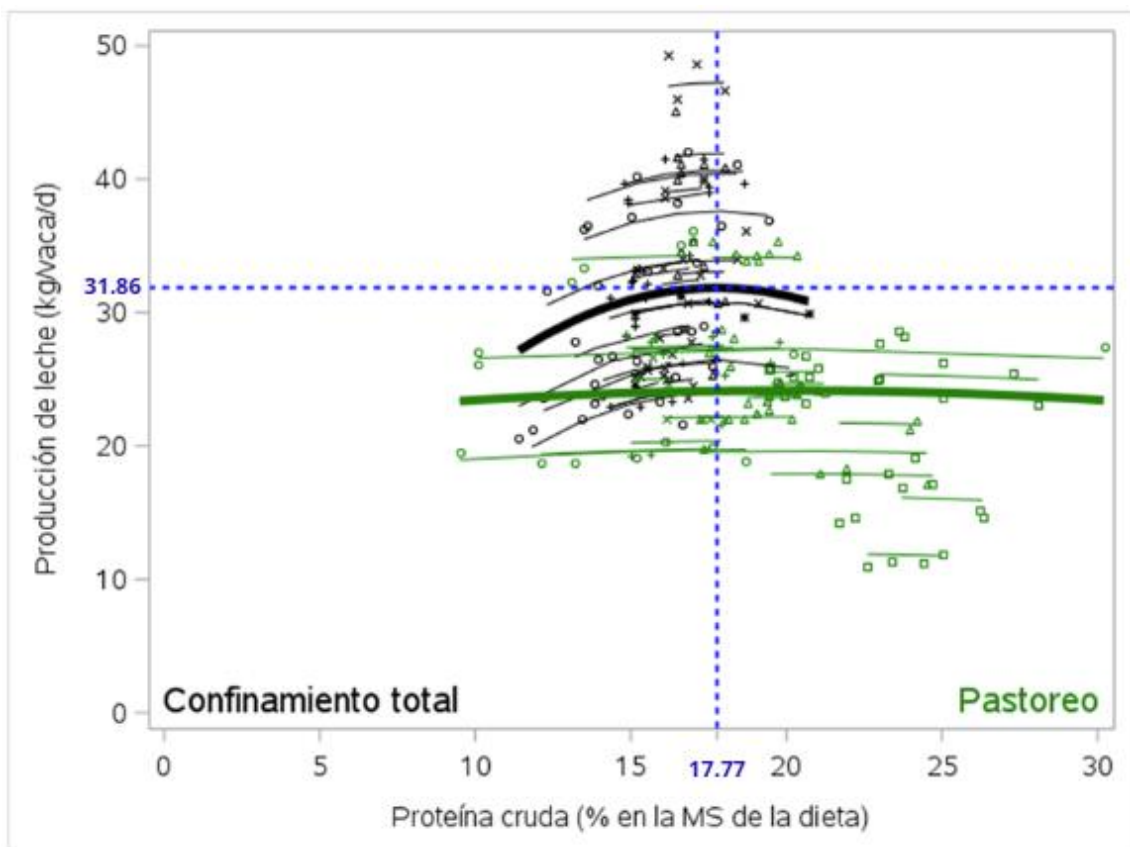


Figura 3. Producción de leche (kg/vaca/d) como función del contenido de proteína cruda en la dieta de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.

Los resultados para la producción de grasa de vacas en el sistema de confinamiento total presentan una respuesta cuadrática clara, alcanzando un valor máximo aproximado de 1.18 kg vaca⁻¹ d⁻¹ a un nivel cercano a 17.6% de PC, seguido de una disminución progresiva conforme la PC de la dieta aumenta. Para las vacas en el sistema de pastoreo, la producción de grasa se mantiene constante alrededor de 0.95-1.00 kg vaca⁻¹ d⁻¹ a lo largo del rango de PC evaluado (Figura 4).

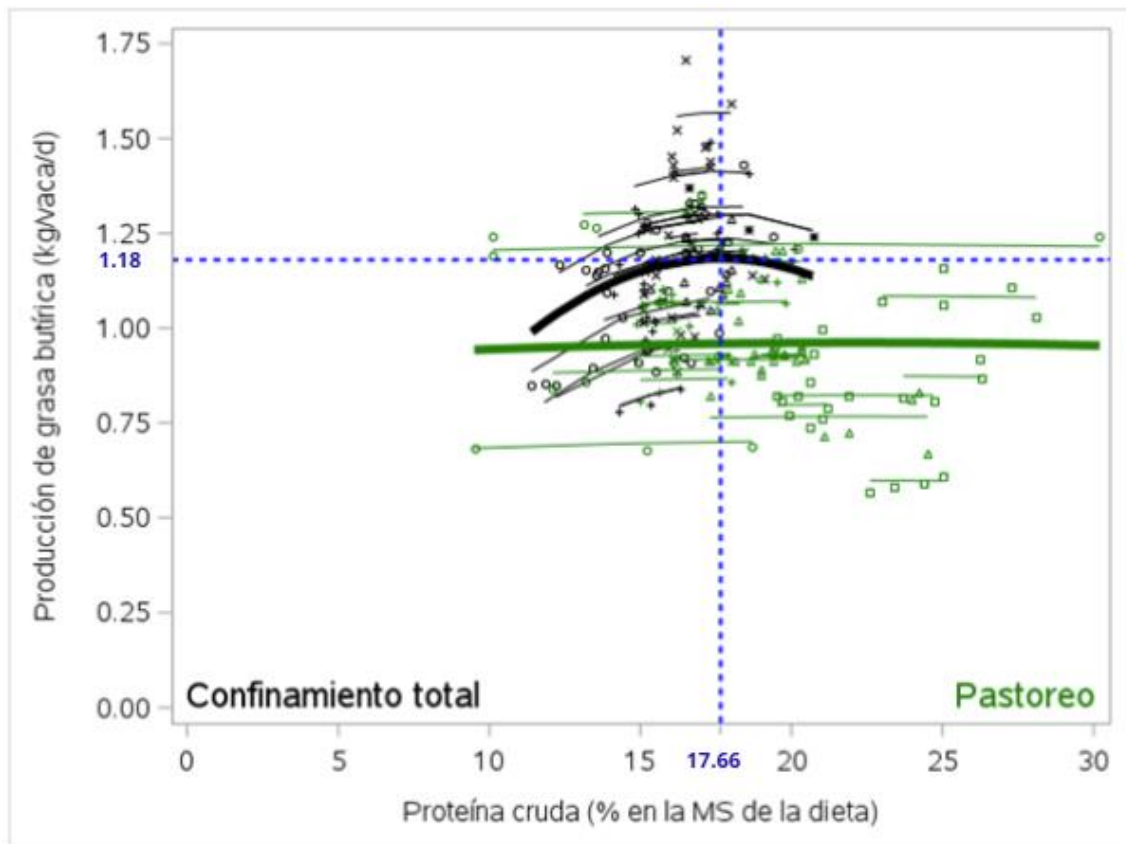


Figura 4. Producción de grasa butírica (kg/vaca/d) como función del contenido de proteína cruda en la dieta de vacas lecheras manejadas en sistemas confinamiento total o en pastoreo.

La Figura 5 muestra que, en el sistema de confinamiento total, la producción de proteína de leche aumenta a medida que hay un incremento en la PC en la dieta, alcanzando un valor máximo cercano a 1.01 kg vaca⁻¹ d⁻¹, a un nivel de PC en la dieta de alrededor de 17.9%. A partir de este punto la respuesta productiva tiende

a estabilizarse o presentar una ligera disminución, lo que sugiere la existencia de un nivel óptimo de PC en la dieta para maximizar la producción diaria de proteína de leche.

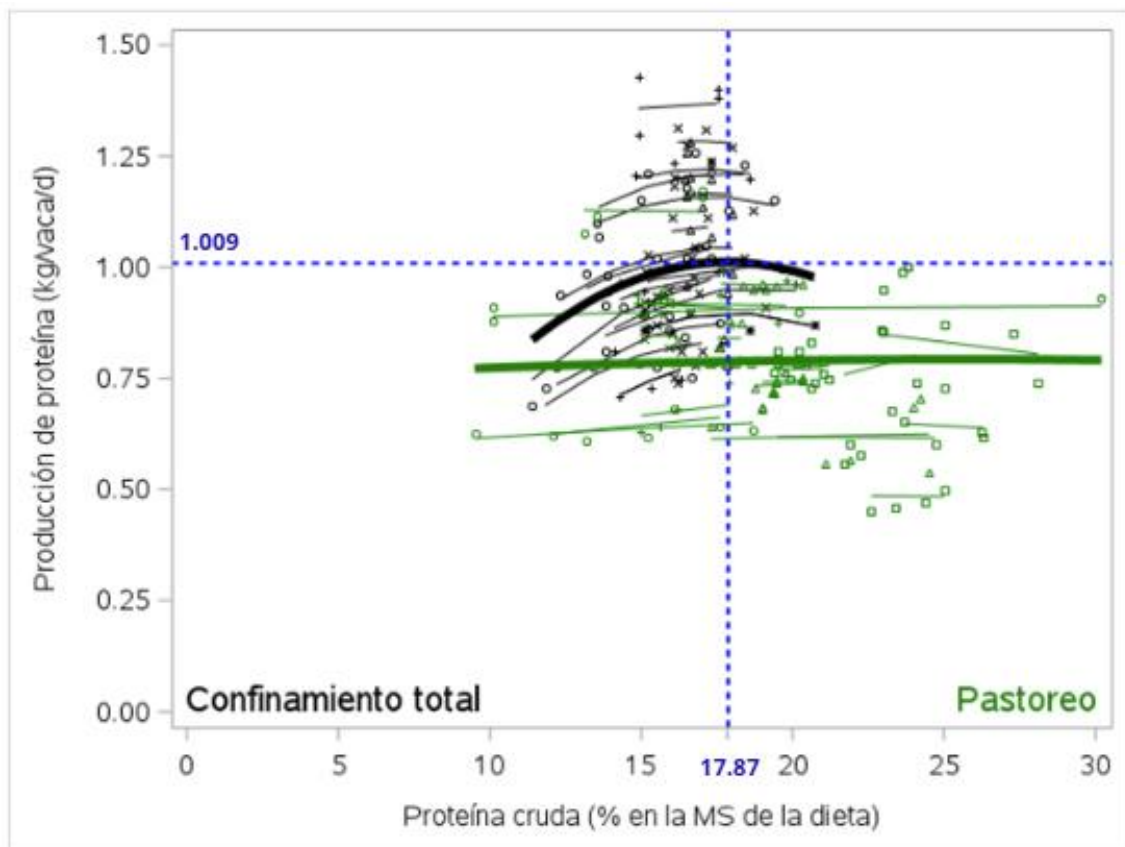


Figura 5. Producción de proteína de leche (kg/vaca/d) como función del contenido de proteína cruda en la dieta de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.

A diferencia de las variables anteriores, la producción de lactosa muestra una respuesta cuadrática significativa en ambos sistemas, aunque con distinta magnitud. En TMR, la producción de lactosa alcanza un valor máximo cercano a $1.56 \text{ kg vaca}^{-1} \text{ d}^{-1}$ con un nivel aproximado de 17.6% de PC en la dieta, seguido de una ligera disminución a niveles mayores. En pastoreo, el máximo es $1.16 \text{ kg vaca}^{-1} \text{ d}^{-1}$ a un nivel cercano a 19.0% de PC en la dieta, con una respuesta más atenuada en comparación con TMR (Figura 6).

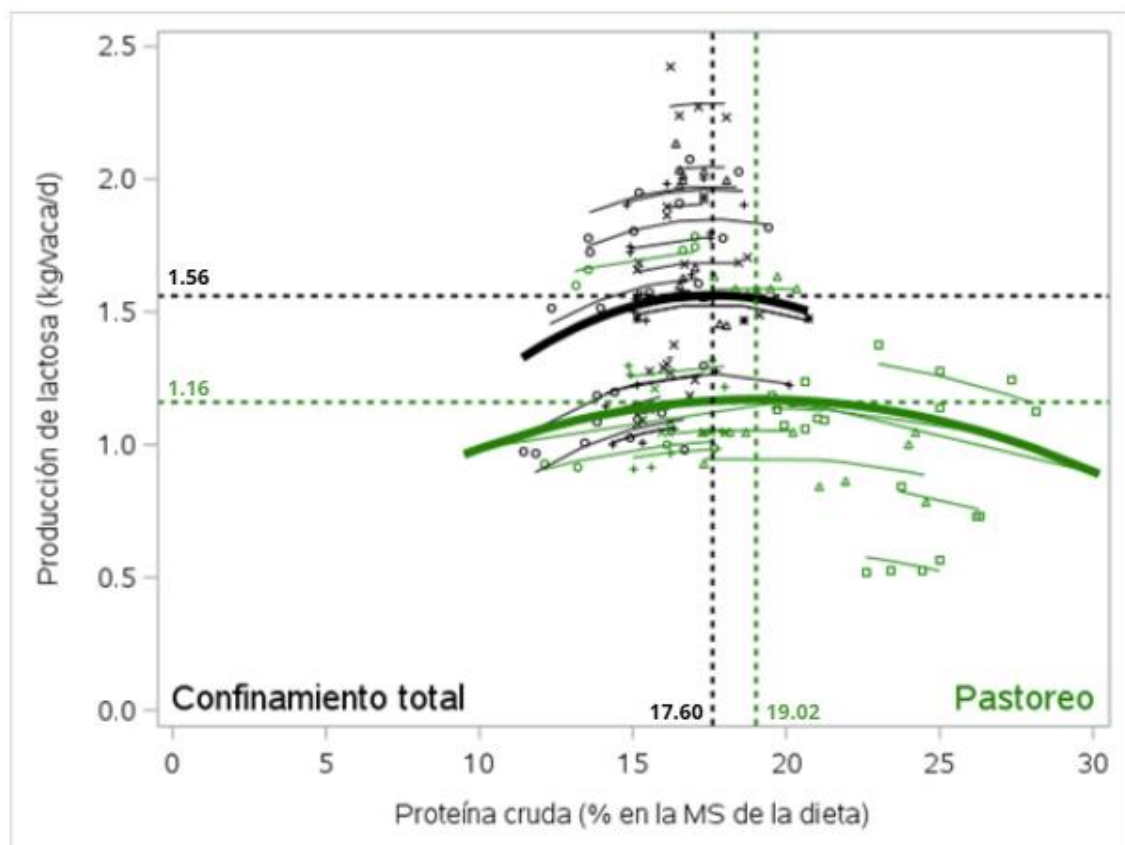


Figura 6. Producción de lactosa (kg/vaca/d) como función del contenido de proteína cruda en la dieta de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.

3.5.2 Composición de la leche en respuesta al contenido de PC en la dieta

El Cuadro 3 presenta los coeficientes de regresión fija global que describen la relación entre el contenido de PC y los porcentajes de grasa (G%), proteína (P%) y lactosa (L%) en la leche de vacas lecheras manejadas bajo sistemas de TMR o en pastoreo. En general, los resultados indican que el incremento del nivel de PC tuvo efectos limitados sobre la composición porcentual de la leche.

Cuadro 3. Coeficientes de la regresión fija (error estándar) para la relación entre el contenido de PC (%) en la materia seca (MS) de la dieta y los porcentajes de grasa (G%), proteína (P%) y lactosa (L%) en la leche de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total con ración totalmente mezclada (TMR) o en pastoreo, calculados con datos experimentales reportados en la literatura.

Variable ²	Sistema ³	Coeficientes de regresión (s.e) de la regresión fija ¹		Prueba de igualdad de los coeficientes de la regresión fija entre sistemas de producción (Pr > F)	
		β_0	β_1	β_0	β_1
G	Pastoreo	3.68(0.36)****	0.0196(0.0197) ^{NS}	0.7821	0.7789
	TMR	3.56(0.19)****	0.0134(0.0099) ^{NS}		
P	Pastoreo	3.25(0.09)****	0.005(0.006) ^{NS}	0.0170	0.2390
	TMR	2.97(0.07)****	0.014(0.004)**		
L	Pastoreo	4.77(0.066)****	-0.00013(0.002) ^{NS}	0.8155	0.6903
	TMR	4.79(0.095)****	-0.00226(0.005) ^{NS}		

¹ NS = no significativo; * = $P \leq 0.05$; ** = $P \leq 0.01$; *** = $P \leq 0.001$; **** = $P \leq 0.0001$.

² G = Grasa butírica en leche (%); P = Proteína en leche (%); L = Lactosa en leche (%).

³ TMR = Ración mezclada completa.

En el caso del porcentaje de grasa en leche (G%), no se observó una asociación significativa con el contenido de PC en ninguno de los sistemas ($P > 0.05$). En pastoreo, el coeficiente lineal fue positivo, pero no significativo ($\beta_1 = 0.0196 \pm 0.0197$), mientras que en TMR se observó un comportamiento similar ($\beta_1 = 0.0134 \pm 0.0099$). La prueba de igualdad de coeficientes indicó que no existieron diferencias significativas entre sistemas, ni para el intercepto ni para la pendiente ($P > 0.05$). Este comportamiento se refleja en la Figura 7, donde los valores de grasa butírica se mantuvieron relativamente constantes a lo largo del rango PC evaluado, sin una tendencia clara de incremento o disminución.

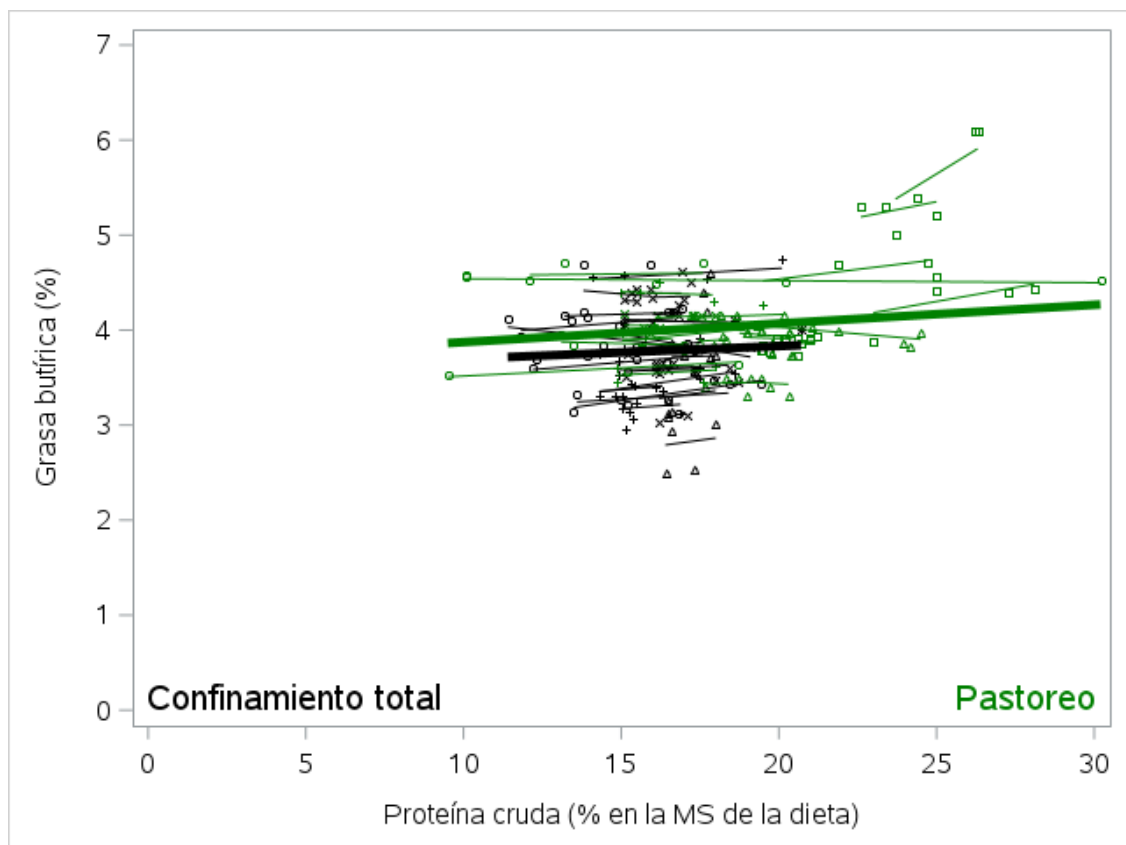


Figura 7. Grasa butírica (%) en leche como función del contenido de proteína cruda en la dieta de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.

Respecto al porcentaje de proteína en leche (P%), se observaron diferencias entre sistemas de alimentación. En TMR, el contenido de proteína en leche presentó una respuesta lineal positiva significativa al incremento del nivel de PC en la dieta ($\beta_1 = 0.014 \pm 0.004$; $P < 0.01$), lo que indica un aumento gradual del porcentaje de proteína en leche conforme se incrementó la PC en la dieta. En contraste, en pastoreo, el efecto lineal fue positivo, pero no significativo ($\beta_1 = 0.005 \pm 0.006$; $P > 0.05$). La prueba de igualdad de coeficientes entre sistemas de alimentación mostró diferencias significativas para el intercepto ($P < 0.05$), pero no para la pendiente lineal, lo que sugiere niveles basales distintos de proteína en leche entre sistemas, con una respuesta más evidente al incremento de PC en la dieta en el sistema de TMR. Este patrón se observa claramente en la Figura 8.

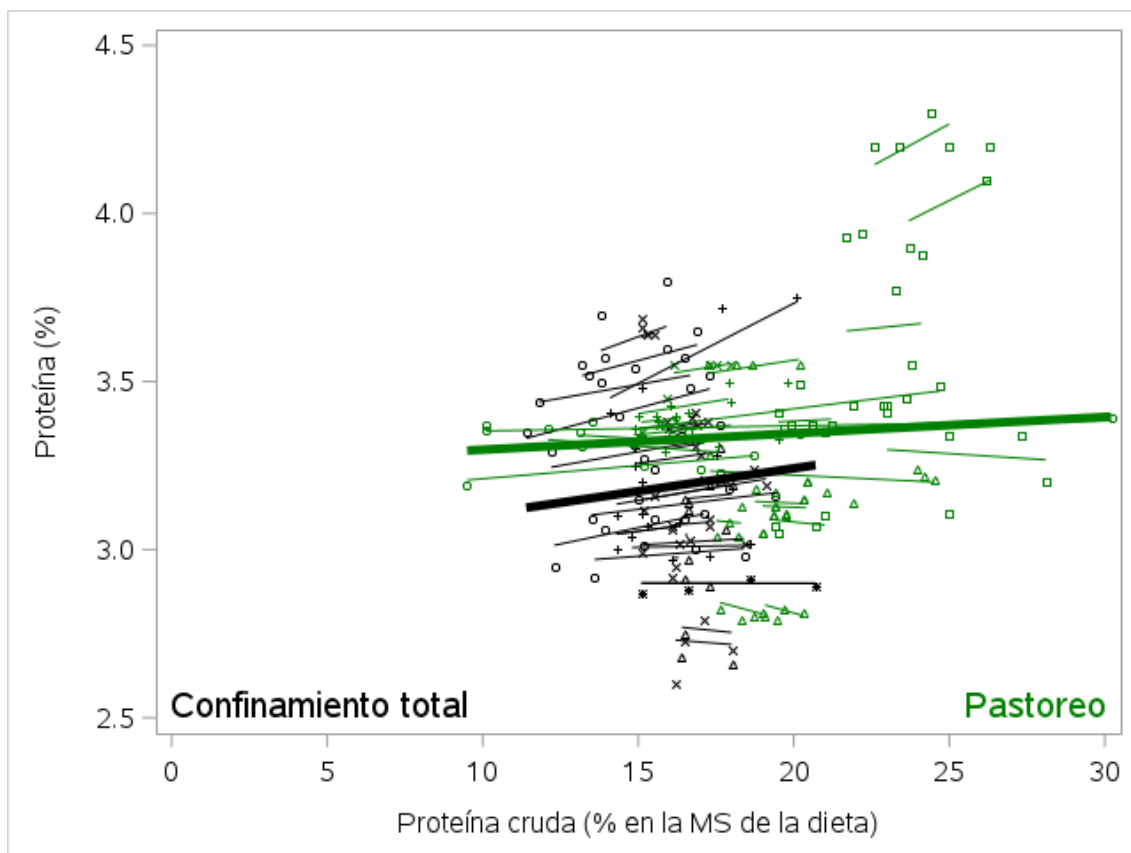


Figura 8. Proteína (%) en leche como función del contenido de proteína cruda en la dieta de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.

En cuanto al porcentaje de lactosa en leche (L%), no se detectó una relación significativa con el contenido de PC en la dieta en ninguno de los sistemas de alimentación comparados. Tanto en pastoreo como en confinamiento total, los coeficientes lineales fueron negativos, pero no significativos ($P > 0.05$), y la prueba de igualdad de coeficientes entre sistemas de alimentación indicó ausencia de diferencias para el intercepto y la pendiente lineal. Los valores de lactosa se mantuvieron estables a lo largo del rango de PC evaluado, lo que confirma que el contenido de PC en la dieta no tuvo un efecto relevante sobre este componente de la leche (Figura 9).

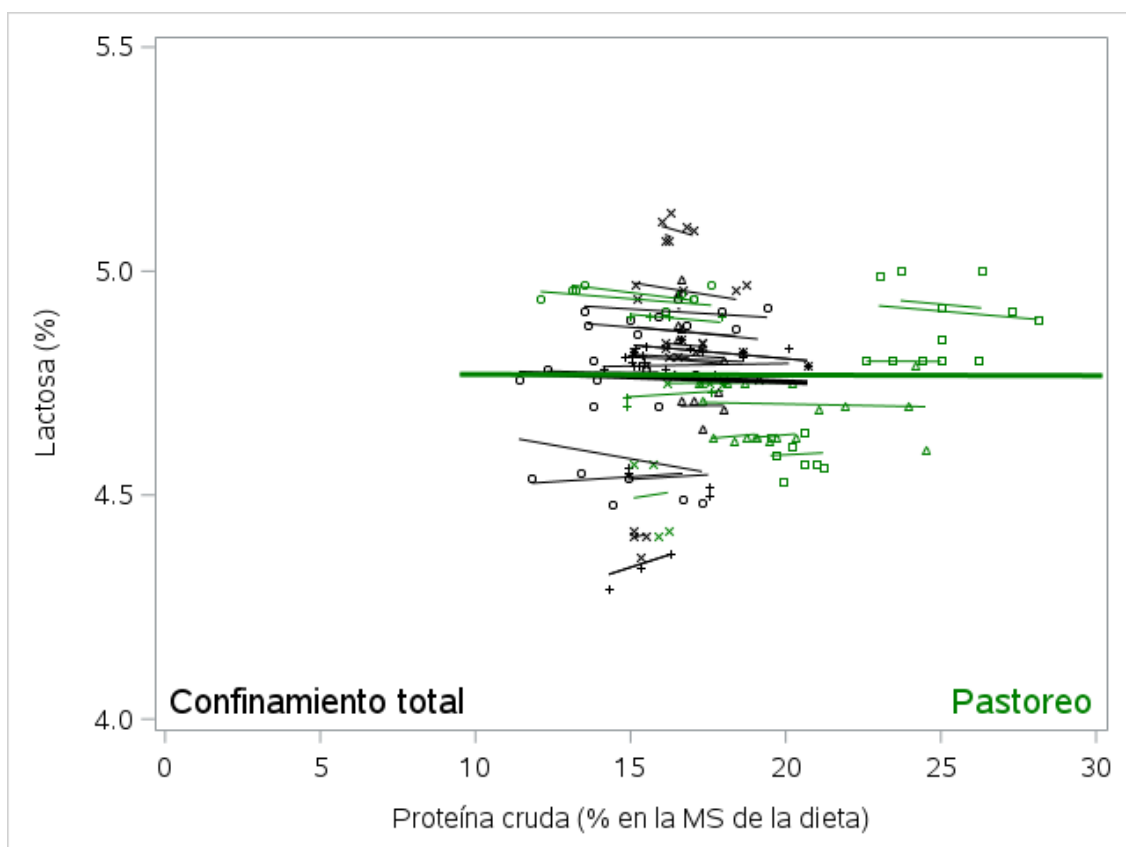


Figura 9. Lactosa (%) en leche como función del contenido de proteína cruda en la dieta de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.

El incremento de PC en la dieta no modificó de manera consistente la composición porcentual de la leche, con excepción del porcentaje de proteína en leche en el sistema de confinamiento total. En este sistema se observó una respuesta lineal positiva. Estos resultados sugieren que los cambios asociados al incremento de PC en la dieta se manifiestan principalmente en los rendimientos absolutos de los componentes lácteos, más que en su concentración porcentual.

3.5.3 Excreción de nitrógeno en leche, orina, heces y estiércol en respuesta al contenido de PC en la dieta

El Cuadro 4 presenta los coeficientes de la regresión fija que describen la relación entre el contenido de PC en la dieta y contenido (g/vaca/d) de nitrógeno en leche (NL), nitrógeno en orina (NO), nitrógeno en heces (NH) y nitrógeno total en estiércol (NE) en vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total

o en pastoreo. En general, los resultados muestran que el incremento del nivel de PC en la dieta se asoció con aumentos significativos en la excreción de nitrógeno, con respuestas más marcadas en el sistema de confinamiento total en comparación con el de pastoreo.

Cuadro 4. Coeficientes de la regresión fija (error estándar) para la relación entre el contenido de PC (%) en la materia seca (MS) de la dieta y los contenidos de nitrógeno en leche (NL), nitrógeno en orina (NO), nitrógeno en heces (NH) y nitrógeno total en estiércol (NE) de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total con ración totalmente mezclada (TMR) o en pastoreo, calculados con datos experimentales reportados en la literatura.

Variable ²	Sistema ³	Coeficientes de regresión (s.e) de la regresión fija ¹		Prueba de igualdad de los coeficientes de la regresión fija entre sistemas de producción (Pr > F)	
		β_0	β_1	β_0	β_1
NL	Pastoreo	135.0(17.5)****	-0.6511(0.82) ^{NS}	0.3227	0.0014
	TMR	113.7(12.4)****	2.8100(0.66)**		
NO	Pastoreo	8.99(56.0) ^{NS}	13.41(2.37)****	0.0003	<.0001
	TMR	-250.15(30.0)****	27.03(1.76)****		
NH	Pastoreo	113.9(22.4)****	2.56(2.15) ^{NS}	0.1268	0.0441
	TMR	57.0(28.9) ^{NS}	8.20(1.67)****		
NE	Pastoreo	270.3(77.3)***	6.92(3.04)*	0.1268	<.0001
	TMR	-148.4(30.3)****	32.6(2.0)****		

¹ NS = no significativo; * = $P \leq 0.05$; ** = $P \leq 0.01$; *** = $P \leq 0.001$; **** = $P \leq 0.0001$.

² NL = Nitrógeno en leche (g/vaca/d); NO = Nitrógeno en orina (g/vaca/d); NH = Nitrógeno en heces (g/vaca/d); NE = Nitrógeno en estiércol (g/vaca/d).

³ TMR = Ración mezclada completa.

Para el nitrógeno en leche (NL), en pastoreo no se observó una relación significativa con el contenido de PC ($\beta_1 = -0.651 \pm 0.82$; $P > 0.05$), lo que indica que el incremento de la PC dietaria no se tradujo en mayores cantidades de nitrógeno secretado en la leche. En contraste, en TMR se observó un incremento lineal positivo y significativo del NL conforme aumentó la PC ($\beta_1 = 2.81 \pm 0.66$; $P > 0.01$). La prueba de igualdad de coeficientes indicó diferencias significativas entre sistemas para la pendiente ($P < 0.01$), lo cual se refleja en la Figura 10, donde los valores de NL son consistentemente mayores en TMR que en pastoreo a lo largo del rango de PC evaluado.

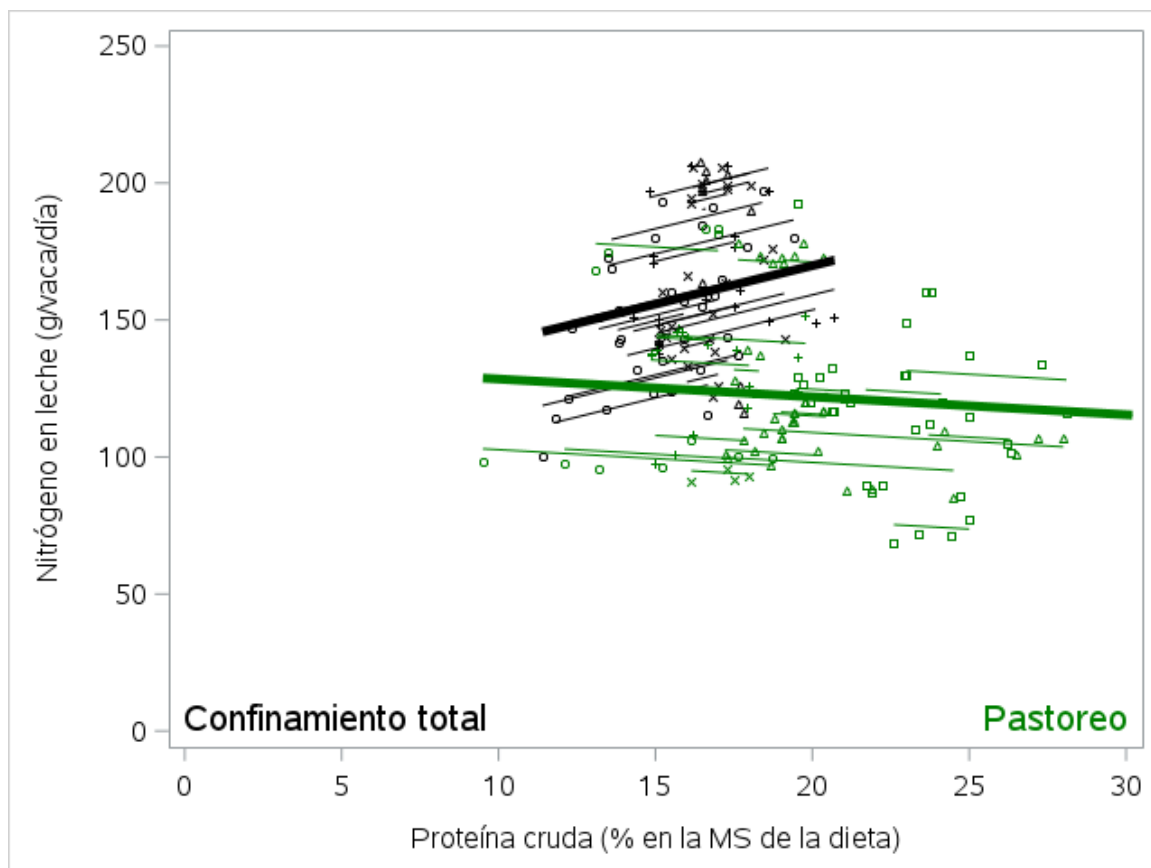


Figura 10. Nitrógeno en leche (g/vaca/d) como función del contenido de proteína cruda en la dieta en vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.

En el caso de NO, ambos sistemas mostraron incrementos lineales altamente significativos conforme se incrementó el contenido de PC en la dieta. Sin embargo, la magnitud del incremento fue considerablemente mayor en TMR ($\beta_1 = 27.03 \pm 1.76$; $P < 0.0001$) en comparación con pastoreo ($\beta_1 = 13.41 \pm 2.37$; $P < 0.0001$). La prueba de igualdad de coeficientes mostró diferencias significativas entre sistemas tanto para el intercepto como para la pendiente ($P < 0.001$), lo que indica que, además de excretar mayores cantidades absolutas de nitrógeno urinario, las vacas en TMR presentan mayor sensibilidad al incremento de PC. Este patrón es claramente visible en la Figura 11.

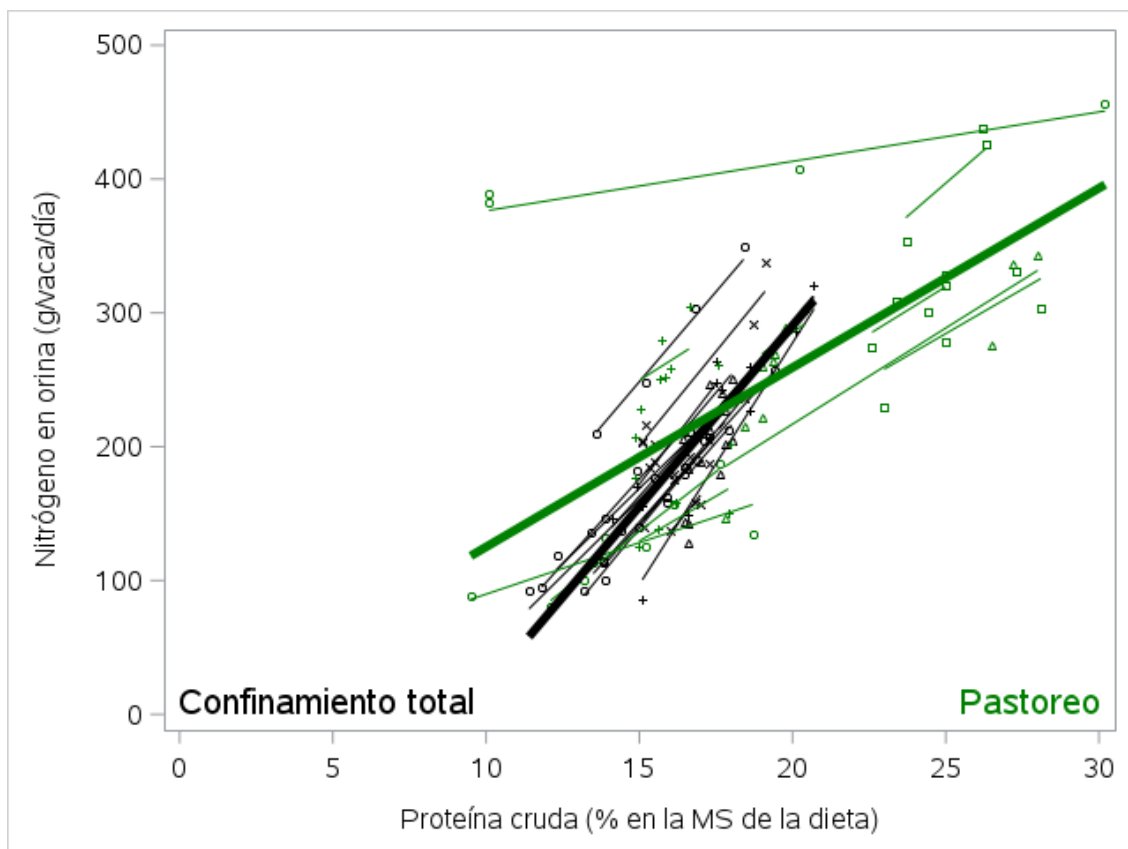


Figura 11. Nitrógeno en orina (g/vaca/d) como función del contenido de proteína cruda en la dieta en vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.

Respecto al NH, el incremento del nivel de PC no tuvo un efecto significativo en pastoreo ($\beta_1 = 2.56 \pm 2.15$; $P > 0.05$), mientras que en TMR se observó un incremento lineal positivo y altamente significativo ($\beta_1 = 8.20 \pm 1.67$; $P < 0.0001$). La prueba de igualdad de coeficientes indicó diferencias entre sistemas para la pendiente ($P < 0.05$), lo cual se refleja en la Figura 12, donde las vacas manejadas en TMR excretaron mayores cantidades de nitrógeno fecal en comparación con las de pastoreo.

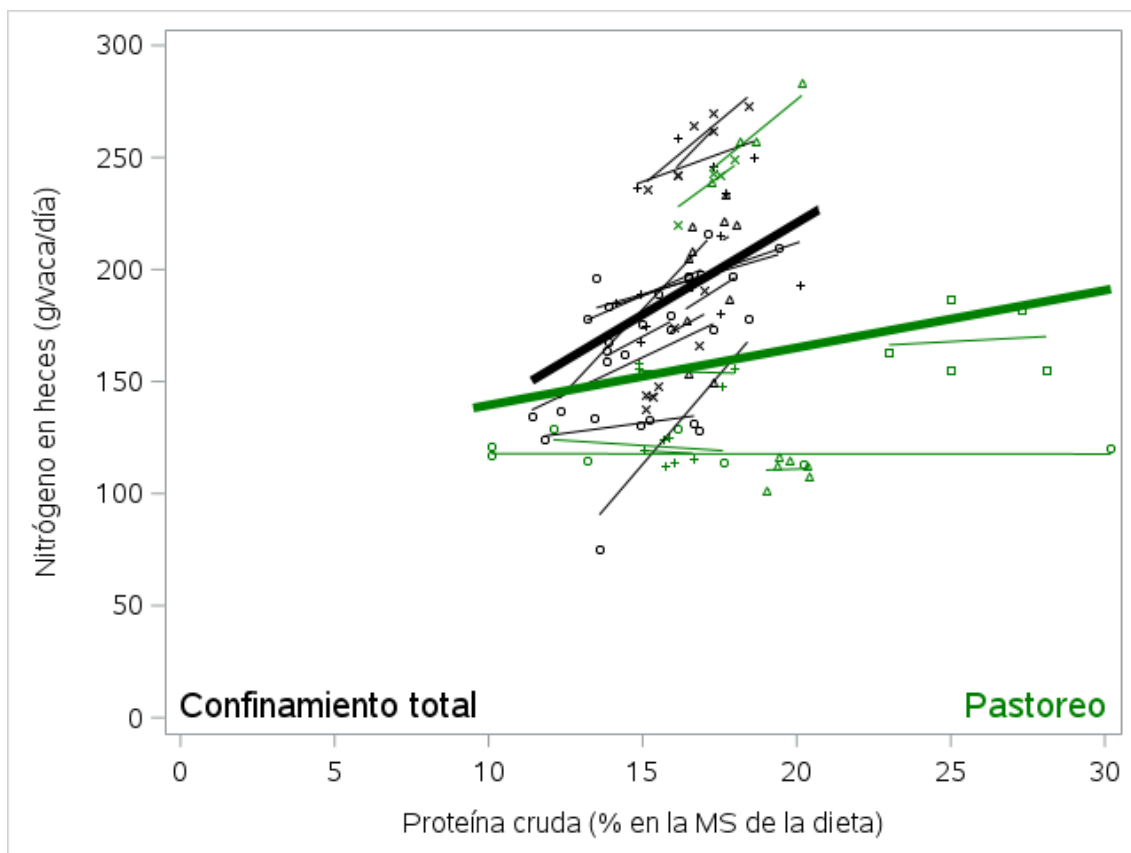


Figura 12. Nitrógeno en heces (g/vaca/d) como función del contenido de proteína cruda en la dieta en vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.

Como consecuencia de estos patrones, el NE aumentó de manera significativa conforme se incrementó la PC en ambos sistemas; no obstante, el incremento fue sustancialmente mayor en TMR ($\beta_1 = 32.6 \pm 2.0$; $P < 0.0001$) que en pastoreo ($\beta_1 = 6.92 \pm 3.04$; $P < 0.05$). La prueba de igualdad de coeficientes confirmó diferencias altamente significativas entre sistemas para la pendiente ($P < 0.0001$). En la Figura 13, se observa que, a niveles similares de PC, las vacas en TMR presentan valores consistentemente más altos de nitrógeno total excretado en estiércol que aquellas manejadas en pastoreo.

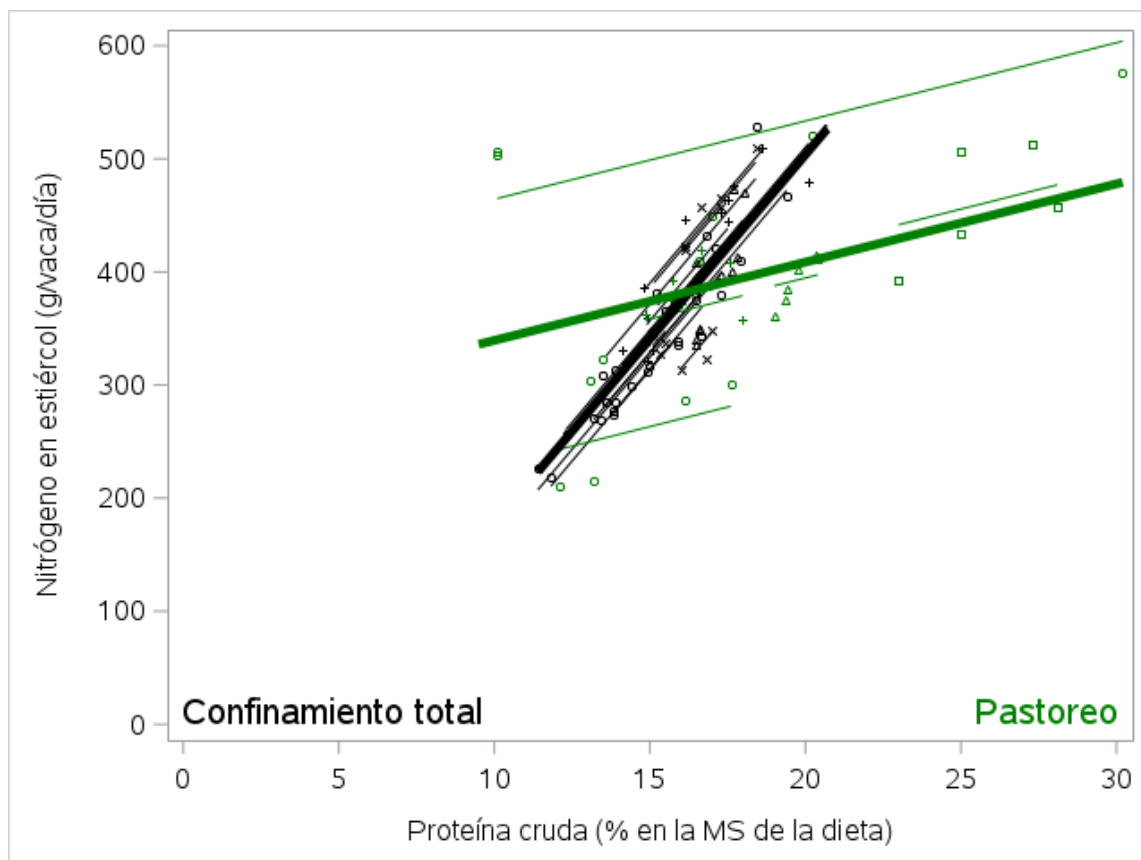


Figura 13. Nitrógeno en estiércol (g/vaca/d) como función del contenido de proteína cruda en la dieta de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.

En conjunto, el Cuadro 4 y las Figuras 10 a 13 evidencia que las vacas lecheras manejadas bajo sistema TMR excretan mayores cantidades de nitrógeno en todas las fracciones evaluadas (leche, orina, heces y estiércol) en comparación con las vacas en pastoreo. Asimismo, el sistema TMR mostró una mayor sensibilidad al incremento del contenido de PC en la dieta, lo que se traduce en un aumento más pronunciado de las pérdidas de nitrógeno al ambiente.

3.5.4 Eficiencia de uso del nitrógeno en respuesta al contenido de PC en la dieta

El Cuadro 5 presenta los coeficientes de la regresión fija que describen la relación entre el contenido de PC en la dieta y la eficiencia del uso del nitrógeno (EUN, %) en vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total con ración totalmente mezclada (TMR) o en pastoreo. En general, los resultados indican que

el incremento del nivel de PC en la dieta se asoció con una disminución significativa de la EUN, en ambos sistemas de producción.

Cuadro 5. Coeficiente de la regresión fija (error estándar) para la relación entre el contenido de PC (%) en la materia seca (MS) de la dieta y la eficiencia de uso del nitrógeno (%) de vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total con ración totalmente mezclada (TMR) o en pastoreo, calculados con datos experimentales reportados en la literatura.

Variable ²	Sistema ³	Coeficientes de regresión (e.s.) de la regresión fija ¹		Prueba de igualdad de los coeficientes de la regresión fija entre sistemas de producción (Pr > F)	
		β_0	β_1	β_0	β_1
EUN	Pastoreo	46.3(4.0)*	-1.18(0.20)**	0.0132	0.0090
	TMR	57.5(1.9)*	-1.80(0.10)**		

¹ * = $P \leq 0.05$; ** = $P \leq 0.01$.

² EUN = Eficiencia de uso del nitrógeno (%).

³ TMR = Ración mezclada completa.

Para la EUN, en ambos sistemas de producción se observó una relación lineal negativa y significativa con el contenido de PC en la dieta ($P < 0.01$). En pastoreo, el coeficiente lineal fue negativo y significativo ($\beta_1 = -1.18 \pm 0.020$; $P < 0.01$), lo que indica que el incremento del nivel de PC en la dieta reduce la eficiencia con la que el nitrógeno consumido es convertido en producto lácteo. De manera similar, en el sistema TMR se observó una disminución significativa de la EUN conforme aumentó la PC ($\beta_1 = -1.80 \pm 0.10$; $P < 0.01$), evidenciado una respuesta más pronunciada en comparación con el sistema de pastoreo.

La prueba de igualdad de coeficientes indicó diferencias significativas entre sistemas tanto para el intercepto ($P < 0.05$) como para la pendiente ($P < 0.01$), lo que sugiera que, además de presentar niveles iniciales distintos de eficiencia, las vacas en TMR muestran mayor sensibilidad a los incrementos en el contenido de PC en la dieta. Este comportamiento se refleja en la Figura 14, donde se observa una disminución marcada de la EUN en el sistema de confinamiento total o en comparación con el de pastoreo a lo largo del rango PC evaluado.

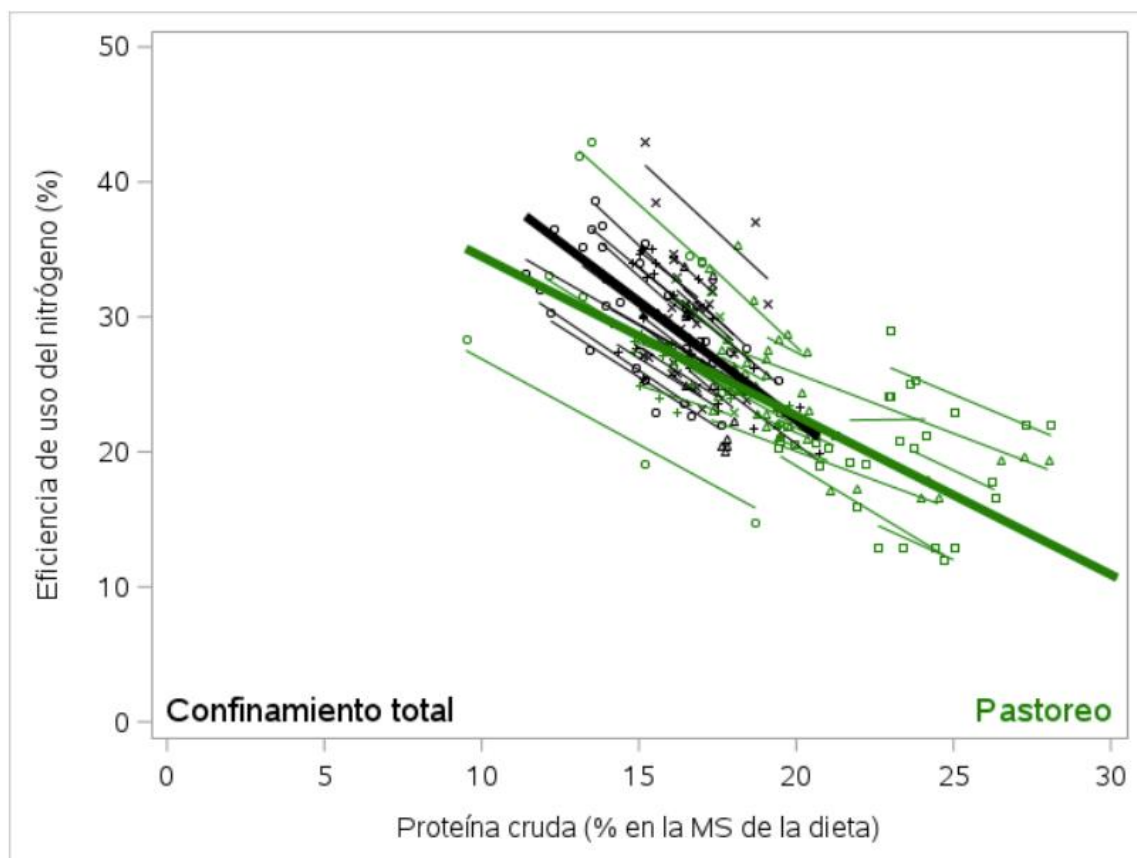


Figura 14. Eficiencia de uso del nitrógeno (%) como función del contenido de proteína cruda en la dieta en vacas lecheras manejadas en sistemas de confinamiento total o en pastoreo.

En conjunto, el Cuadro 5 y la Figura 14 muestran que la EUN disminuye conforme aumenta el contenido de PC en la dieta, con una respuesta más clara en el sistema TMR. Este patrón sugiere menor eficiencia en el aprovechamiento del nitrógeno a niveles elevados de PC en la dieta, particularmente en sistemas de confinamiento total.

3.6 DISCUSIÓN

3.6.1 Respuesta de la producción de leche y componentes al incremento de PC en la dieta

Los resultados obtenidos indican que, bajo condiciones de pastoreo, el incremento en el contenido de proteína cruda (PC) no produjo cambios significativos en las producciones de leche (PL), grasa (PG), o proteína (PP). Este

comportamiento ha sido documentado en sistemas de pastoreo, donde las praderas de alta calidad suelen aportar cantidades elevadas de proteína degradable en el rumen, lo que limita la respuesta productiva a incrementos adicionales de PC en la dieta. Estudios recientes muestran que, en sistemas de pastoreo con suplementación proteica, no se observan diferencias estadísticas en producción de leche al incrementar la PC en el suplemento, debido a que la proteína del forraje ya cubre los requerimientos del animal (Esparza-Jiménez et al., 2021).

Además, en nutrición de rumiantes indican que solo entre 20 y 35% de la PC consumida por la vaca se convierte en proteína de leche, mientras que el resto se pierde principalmente como nitrógeno excretado, lo que reduce la eficiencia de utilización del nitrógeno cuando la dieta contiene niveles excesivos de PC (Huang et al., 2023). Esto puede explicar la ausencia de respuesta en las variables productivas en el sistema de pastoreo observada en el presente estudio.

En contraste, en el sistema TMR se observaron coeficientes lineales positivos y cuadráticos negativos significativos para PL, PG y PP, lo que indica una respuesta productiva al cambio en el nivel de PC. Este patrón sugiere la existencia de una respuesta curvilínea, donde incrementos iniciales de proteína favorecen la producción, pero niveles excesivos reducen la eficiencia de utilización del nitrógeno. En este contexto, los sistemas TMR, al permitir un mayor control del balance entre energía y proteína en la dieta, pueden favorecer un suministro más preciso de aminoácidos absorbibles, lo que se refleja en mejoras en la producción y composición de la leche (NRC, 2021).

Asimismo, estudios sobre alimentación de precisión en vacas lecheras han demostrado que pequeños cambios en el suministro de nutrientes en dietas completas pueden generar respuestas medibles en la producción de leche, debido a la variabilidad en los requerimientos y en la respuesta individual de los animales (Souza et al., 2025).

Las diferencias observadas entre sistemas de alimentación en el presente estudio también coinciden con investigaciones recientes que muestran que los sistemas basados en pastoreo presentan menor capacidad de respuesta a modificaciones nutricionales específicas, debido a la variabilidad en la calidad del forraje y en el consumo de materia seca, mientras que los sistemas TMR permiten formular dietas más precisa y consistente (Minogue et al., 2025).

3.6.2 Composición de la leche en respuesta al contenido de PC en la dieta

Los resultados indican que el incremento del contenido de PC en la dieta tuvo efectos limitados sobre la composición porcentual de la leche, particularmente en los porcentajes de grasa (G%) y lactosa (L%), tanto en sistemas de pastoreo como en sistemas TMR. Este comportamiento coincide con diversos estudios recientes que han demostrado que la composición de la leche es relativamente estable frente a cambios moderados en el nivel de PC en dieta, debido a que los principales determinantes de la grasa y lactosa en la leche están más relacionados con el metabolismo energético y la fermentación ruminal que con el suministro directo de proteína (Barros et al., 2017; Garamu et al., 2019).

En el caso del porcentaje de grasa, los coeficientes lineales no significativos observados en ambos sistemas sugieren que el incremento de PC no tuvo un efecto directo sobre esta fracción de la leche. Esto concuerda con estudios recientes que indican que la síntesis de grasa en leche depende principalmente de la producción ácidos grasos volátiles, especialmente acetato y butirato, derivados de la fermentación de carbohidratos estructurales a nivel ruminal, más que del nivel de PC que integra la dieta (Sucak et al., 2017; Tian et al., 2022). Investigaciones han señalado que modificaciones en el nivel de PC generalmente tienen poco impacto sobre el porcentaje de grasa de la leche, a menos que estén acompañadas por cambios en el contenido de fibra o en el balance energético de la dieta (Abdellaoui et al., 2022; Štolcová et al., 2024).

En cuanto al porcentaje de proteína en la leche (P%), se observó una tendencia positiva en el sistema TMR, mientras que en pastoreo no se detectó un efecto

estadístico. Este resultado puede explicarse por el mayor control nutricional que ofrecen las dietas TMR, donde es posible optimizar el suministro de proteína metabolizable y aminoácidos esenciales, factores clave para la síntesis de proteína en leche (Kim & Lee, 2021). En este contexto, se ha demostrado que incrementos moderados en la PC pueden aumentar ligeramente el P%, aunque con respuestas limitadas (Broderick et al., 2003). Sin embargo, en sistemas de pastoreo, donde los forrajes presentan una alta degradabilidad en el rumen (McCarthy et al., 2023), el suministro adicional de PC no necesariamente se traduce en mayor respuesta en el P%, debido a que una proporción importante del nitrógeno consumido no es utilizada eficientemente para la síntesis de proteína presente en leche (Doran et al., 2022).

Por otro lado, el L% no mostró diferencia significativa con el contenido de PC, en ninguno de los sistemas de alimentación. Esto era esperable, ya que la lactosa es el principal agente osmótico de la leche y su síntesis depende directamente de la disponibilidad de glucosa en la glándula mamaria, lo que influye en la regulación del volumen de leche producido (Antanaitis et al., 2024).

La prueba de igualdad de coeficientes entre sistemas mostró diferencias significativas únicamente para el intercepto (β_0) en el porcentaje de proteína ($P < 0.05$), lo que sugiere que el nivel de proteína en la leche difiere entre sistemas de alimentación, aunque la pendiente de respuesta al incremento de PC no fue estadísticamente diferente. Esto podría reflejar diferencias en el balance energético de la dieta, consumo de materia seca y perfil de aminoácidos absorbidos, factores que suelen variar entre sistemas TMR y sistemas de pastoreo.

3.6.3 Excreción de nitrógeno en leche, orina, heces y estiércol en respuesta al contenido de PC en la dieta

El incremento del contenido de PC en la dieta se asoció con aumentos significativos en la excreción de nitrógeno, particularmente en NO y NE, con respuestas más marcadas en vacas alimentadas con dietas TMR en

comparación con sistemas de pastoreo. Este patrón es consistente con la literatura, que indica que el aumento del nivel de PC de la dieta incrementa la cantidad de nitrógeno ingerido; pero solo una fracción relativamente pequeña es retenida en forma de proteína en leche, mientras que el resto se excreta principalmente en orina y heces (Elizondo, 2006).

En el caso de NL, el sistema TMR mostró efecto positivo significativo del contenido de PC ($\beta_1 = 2.81$; $P < 0.01$), mientras que en pastoreo no se observó una relación significativa. Esto sugiere que en dietas TMR el incremento de PC puede mejorar la disponibilidad de proteína metabolizable y aminoácidos absorbibles, favoreciendo la síntesis de proteína en leche (Schwab & Broderick, 2017). Sin embargo, se ha observado que solo entre 20 y 35% del nitrógeno consumido por las vacas lecheras se utiliza en la síntesis de leche, lo que refleja una eficiencia relativamente baja en la utilización del nitrógeno dietario (Hristov et al., 2019).

El aumento significativo del NO observado en ambos sistemas, especialmente TMR, coincide con lo reportado en la literatura, donde niveles elevados de proteína en la dieta incrementan la absorción de amoníaco en el rumen, lo que se refleja en mayores concentraciones de urea y en un aumento en la excreción de nitrógeno (Chowdhury et al., 2024). Este amoníaco es absorbido hacia el torrente sanguíneo y convertido en urea en el hígado, la cual se excreta principalmente en la orina (Tang et al., 2025). Algunos autores han demostrado que el nitrógeno urinario es la principal vía de pérdida de nitrógeno en vacas lecheras, representando en muchos casos más del 50.0% del nitrógeno excretado (Tamminga, 1992), mientras que el incremento en el nivel de PC en la dieta se asocia con aumento en la excreción de nitrógeno urinario (Zelege et al., 2025). Esto explica las pérdidas positivas observadas para NO en ambos sistemas, con valores mayores en TMR ($\beta_1 = 27.03$) que en pastoreo ($\beta_1 = 13.41$).

En relación con el NH, se observó un incremento significativo únicamente en el sistema TMR, mientras que en pastoreo el efecto no fue significativo. La excreción fecal de nitrógeno está relacionada principalmente con la proteína no digerida y con la proteína microbiana que no se absorbe en el intestino, así como con compuestos nitrogenados asociados a la fracción fibrosa de la dieta (Simoni et al., 2021). Las evidencias científicas sugieren que dietas TMR con altos niveles de PC, pueden aumentar la excreción fecal de nitrógeno, debido a un mayor consumo de materia seca y nitrógeno (Johansen et al., 2022).

Finalmente, el NE aumentó significativamente con el incremento de PC en ambos sistemas, con una respuesta mucho más pronunciada en TMR. Este resultado refleja la suma de las pérdidas de nitrógeno urinario y fecal y es consistente con estudios recientes que indican que el aumento del contenido de proteína en la dieta incrementa la excreción total de nitrógeno, lo cual se asocia con mayores pérdidas al ambiente en forma de emisiones gaseosas (Powell et al., 2015). De acuerdo con la literatura, dietas con niveles excesivos de PC pueden aumentar la emisión potencial de amoníaco y óxido nítrico provenientes del estiércol, contribuyendo a la contaminación atmosférica y a la eutroficación de suelos y cuerpos de agua (Arriola et al., 2013).

Las diferencias observadas entre sistemas de alimentación en las pendientes de regresión también reflejan que los sistemas TMR suelen presentar mayor consumo de materia seca y mayor control sobre la composición de la dieta, lo que puede incrementar la ingesta total del nitrógeno y, por lo tanto, la cantidad excretada. En contraste, en sistemas de pastoreo el consumo de proteína está influenciado por la variabilidad del forraje y por la dinámica del pastoreo, lo que puede moderar la respuesta en la excreción de nitrógeno (Kolver & Muller, 2018).

3.6.4 Eficiencia de uso del nitrógeno en respuesta al contenido de PC en la dieta

El comportamiento observado en la EUN es consistente con los patrones descritos en las diferentes fracciones de excreción de nitrógeno. El incremento

simultáneo de NL, NO, NH y NE, particularmente en el sistema TMR, indica que la mayor proporción del nitrógeno consumido no es retenida en forma de proteína en leche, sino que es excretada al ambiente, lo que reduce la eficiencia global de utilización del nitrógeno.

Este resultado coincide con la literatura, donde se ha demostrado que el aumento en el nivel de proteína en la dieta incrementa la ingesta total de nitrógeno, pero no necesariamente mejora su aprovechamiento productivo, debido a limitaciones en la sincronización entre energía y proteína a nivel ruminal y en la utilización de aminoácidos a nivel tisular (Zhang et al., 2025). En este sentido, la mayor pendiente negativa observada en el sistema TMR sugiere que, aunque este sistema permite mayores niveles de producción, también presenta la mayor pérdida relativa de nitrógeno.

Por el contrario, en sistemas de pastoreo, la menor respuesta en las variables de excreción de nitrógeno y la menor pendiente negativa de la EUN pueden estar asociadas a menor cantidad de ingesta total de nitrógeno y a mayor variabilidad en el consumo y calidad del forraje, lo que modula la respuesta al incremento de proteína en la dieta. En conjunto, estos resultados confirman que el incremento de PC reduce la eficiencia de utilización del nitrógeno en ambos sistemas de producción, siendo este efecto más pronunciado en sistemas de confinamiento total.

3.7 CONCLUSIONES

La respuesta al incremento del contenido de proteína cruda en la dieta de vacas lecheras está relacionada directamente con el sistema de alimentación, los valores óptimos detectados para una adición de proteína cruda en dieta son de 17.5–18.0% para tener beneficios en equilibrio tanto en producción de leche como ambientales.

En sistemas ración totalmente mezclada, el aumento de la proteína cruda en dieta permitió detectar estadísticamente una respuesta cuadrática en la producción de

leche y mayor incremento de nitrógeno excretado al ambiente. Respecto a los sistemas en pastoreo, el incremento de la proteína cruda mostró respuestas productivas limitadas, pero menos pronunciado que en el sistema con ración totalmente mezclada, de igual forma se evidenciaron pérdidas de nitrógeno por excreción en todas las fracciones evaluadas.

En conjunto, los resultados indican que incrementar la proteína cruda porcentual por encima de niveles óptimos no mejora la productividad, pero si hay pérdidas por la excreción de nitrógeno al suministrar una proporción superior a las óptimas. El ajuste de proteína cruda es clave, de acuerdo con el sistema de alimentación que se esté manejando, para mejorar la eficiencia metabólica del nitrógeno y minimizar el impacto ambiental en los diferentes de sistemas de producción de bovinos lecheros.

3.8 AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por su apoyo a través de la beca nacional de posgrado (1347196). Este apoyo que hizo posible este proyecto en el Programa de Maestría en Ciencias en innovación Ganadera del Posgrado en Producción Animal y a la Universidad Autónoma Chapingo por sus contribuciones.

3.9 LITERATURA CITADA

- Abdellaoui, L., Khelifi-Touhami, N. A., Mebkhout, F., Tarzaali, D., Yahiaoui, W. I., Hamdi, T. M., & Ouchene, N. (2022). Effect of feed on the milk protein and fat composition. *Agricultural Science and Technology*, 14(2), 54–61. <https://doi.org/10.15547/ast.2022.02.019>
- *Afzalzadeh, A., Rafiee, H., Khadem, A. A., & Asadi, A. (2010). Effects of ratios of non-fibre carbohydrates to rumen degradable protein in diets of Holstein cows: 1. Feed intake, digestibility and milk production. *South African Journal of Animal Science*, 40(3), 204–212.
- Álvarez-Sánchez, A., García-Martínez, A., & Albarrán-Portillo, B. (2023). Productive and economic performance of Brown Swiss cows at different stages of lactation fed two crude protein levels. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 26(3). <https://doi.org/10.56369/tsaes.4721>

- Antanaitis, R., Džermeikaitė, K., Krištolaitytė, J., Girdauskaitė, A., Arlauskaitė, S., Tolkaciovaitė, K., & Baumgartner, W. (2024). The relation between milk lactose concentration and the rumination, feeding, and locomotion behavior of early-lactation dairy cows. *Animals*, 14(6), 836. <https://doi.org/10.3390/ani14060836>
- Arriola A., S. I., Knapp, J. R., & Hanigan, M. D. (2014). Current representation and future trends of predicting amino acid utilization in the lactating dairy cow. *Journal of Dairy Science*, 97(7), 4000–4017. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7392>
- *Arriola A., S. I., Bell, A. L., Estes, K., Ropelewski, J., de Veth, M. J., & Hanigan, M. D. (2014). Effects of reduced dietary protein and supplemental rumen-protected essential amino acids on the nitrogen efficiency of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 97(9), 5688–5699. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7833>
- *Baker, L. D., Ferguson, J. D., & Chalupa, W. (1995). Responses in urea and true protein of milk to different protein feeding schemes for dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 78(11), 2424–2434.
- Barros, T., Quaassdorff, M. A., Aguerre, M. J., Olmos C., J. J., Bertics, S. J., Crump, P. M., & Wattiaux, M. A. (2017). Effects of dietary crude protein concentration on late-lactation dairy cow performance and indicators of nitrogen utilization. *Journal of Dairy Science*, 100(7), 5434–5448. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11917>
- *Brito, A. F., & Broderick, G. A. (2007). Effects of different protein supplements on milk production and nutrient utilization in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 90, 1816–1827.
- *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.
- *Broderick, G. A., Stevenson, M. J., Patton, R. A., Lobos, N. E., & Olmos Colmenero, J. J. (2008). Effect of supplementing rumen-protected methionine on production and nitrogen excretion in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 91(3), 1092–1102. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0769>
- *Burgos, S. A., Fadel, J. G., & DePeters, E. J. (2007). Prediction of ammonia emission from dairy cattle manure based on milk urea nitrogen: Relation of milk urea nitrogen to urine urea nitrogen excretion. *Journal of Dairy Science*, 90, 5499–5508. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0299>
- *Burgos, S. A., Embertson, N. M., Zhao, Y., Mitloehner, F. M., DePeters, E. J., & Fadel, J. G. (2010). Prediction of ammonia emission from dairy cattle manure based on milk urea nitrogen: Relation of milk urea nitrogen to ammonia emissions. *Journal of Dairy Science*, 93(6), 2377–2386. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2415>
- *Carruthers, V. R., & Neil, P. G. (1997). Milk production and ruminal metabolites from cows offered two pasture diets supplemented with non-structural carbohydrate. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 40(4), 513–521. <https://doi.org/10.1080/00288233.1997.9513273>

- Chowdhury, M. R., Wilkinson, R. G., & Sinclair, L. A. (2024). Reducing dietary protein and supplementation with starch or rumen-protected methionine and its effect on performance and nitrogen efficiency in dairy cows fed a red clover and grass silage-based diet. *Journal of Dairy Science*, 107(6), 3543–3557. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23987>
- *Colombini, S., Galassi, G., Crovetto, G. M., & Rapetti, L. (2012). Milk production, nitrogen balance, and fiber digestibility prediction of corn, whole plant grain sorghum, and forage sorghum silages in the dairy cow. *Journal of Dairy Science*, 95, 4457–4467. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4444>
- *Cyriac, J., Rius, A. G., McGilliard, M. L., Pearson, R. E., Bequette, B. J., & Hanigan, M. D. (2008). Lactation performance of mid-lactation dairy cows fed ruminally degradable protein at concentrations lower than National Research Council recommendations. *Journal of Dairy Science*, 91(12), 4704–4713. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1112>
- *Danes, M. A. C., Chagas, L. J., Pedroso, A. M., & Santos, F. A. P. (2013). Effect of protein supplementation on milk production and metabolism of dairy cows grazing tropical grass. *Journal of Dairy Science*, 96, 407–419. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5607>
- Doran, M. J., Mulligan, F. J., Lynch, M. B., Fahey, A. G., Ryan, N. J., McDonnell, C., McCabe, S., & Pierce, K. M. (2022). Effect of supplement crude protein concentration on milk production over the main grazing season and on nitrogen excretion in late-lactation grazing dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 105(1), 347–360. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20743>
- Doran, M. J., Mulligan, F. J., Lynch, M. B., Fahey, A. G., Markiewicz-Keszycka, M., Rajauria, G., & Pierce, K. M. (2023). Effects of protein supplementation strategy and genotype on milk production and nitrogen utilisation efficiency in late-lactation, spring-calving grazing dairy cows. *Animals*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/ani13040570>
- Esparza-Jiménez, S., Albarrán-Portillo, B., González-Ronquillo, M., García-Martínez, An., Vázquez-Armijo, J. F., & Arriaga-Jordán, C. M. (2021). Rendimiento de leche derivado de energía y proteína de vacas en pastoreo recibiendo suplementos en un sistema agrosilvopastoril. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 12(1), 87–104. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i1.5529>
- Elizondo S., J. (2006). El nitrógeno en los sistemas ganaderos de leche. *Agronomía Mesoamericana*, 17(1), 69–77.
- *Frank, B., & Swensson, C. (2002). Relationship between content of crude protein in rations for dairy cows and milk yield, concentration of urea in milk and ammonia emissions. *Journal of Dairy Science*, 85(7), 1829–1838.
- Garamu, K. (2019). Significance of feed supplementation on milk yield and milk composition of dairy cow. *Dairy and Veterinary Sciences Journal*, 13(2), 1–9. <https://doi.org/10.19080/JDVS.2019.13.555860>

- *Haig, P. A., Mutsvangwa, T., Spratt, R., & McBride, B. W. (2002). Effects of dietary protein solubility on nitrogen losses from lactating dairy cows and comparison with predictions from the Cornell Net Carbohydrate and Protein System. *Journal of Dairy Science*, 85(5), 1208–1217.
- *Higgs, R. J., Cosgrove, G. P., Burke, J. L., Lane, G. A., Pacheco, D., Fraser, K., Death, A. F., & Ford, J. L. (2009). Effect of white clover containing either high or low concentrations of water-soluble carbohydrate on metabolic indicators of protein degradation in the rumen of dairy cows. *Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production*, 70, 23–28.
- *Higgs, R. J., Sheahan, A. J., Mandok, K., Van Amburgh, M. E., & Roche, J. R. (2013). The effect of starch-, fiber-, or sugar-based supplements on nitrogen utilization in grazing dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 96, 1–10. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6117>
- Hristov, A. N., Bannink, A., Crompton, L. A., Huhtanen, P., Kreuzer, M., McGee, M., ...& Yu, Z. (2019). Nitrogen in ruminant nutrition: A review of measurement techniques. *Journal of Dairy Science*, 102(7), 5811–5852. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15829>
- Huang, B., Khan, M. Z., Kou, X., Chen, Y., Liang, H., Ullah, Q., ...& Wang, C. (2023). Enhancing metabolism and milk production performance in periparturient dairy cattle through rumen-protected methionine and choline supplementation. *Metabolites*, 13(10), 1080. <https://doi.org/10.3390/metabo13101080>
- *Humphreys, J., O'Connell, K., & Casey, I. A. (2008). Nitrogen flows and balances in four grassland-based systems of dairy production on a clay-loam soil in a moist temperate climate. *Grass and Forage Science*, 63, 467–480. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2008.00660.x>
- *Hymes-Fecht, U. C., Broderick, G. A., Muck, R. E., & Grabber, J. H. (2013). Replacing alfalfa or red clover silage with birdsfoot trefoil silage in total mixed rations increases production of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 96, 460–469. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5724>
- Imran, M., Pasha, T. N., Shahid, M. Q., Babar, I., & Ul Haque, M. N. (2017). Effect of increasing dietary metabolizable protein on nitrogen efficiency in Holstein dairy cows. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 30(5), 660–665. <https://doi.org/10.5713/ajas.16.0564>
- Johansen, M., Madsen, P. A., Brask-Pedersen, D. N., & Lund, P. (2022). Effect of age and dietary crude protein level on nitrogen excretion in dairy heifers. *Livestock Science*, 264, 105058. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.105058>
- *Kalscheur, K. F., Baldwin VI, R. L., Glenn, B. P., & Kohn, R. A. (2006). Milk production of dairy cows fed differing concentrations of rumen-degraded protein. *Journal of Dairy Science*, 89, 249–259.

- *Katongole, C. B., & Yan, T. (2020). Effect of varying dietary crude protein level on feed intake, nutrient digestibility, milk production, and nitrogen use efficiency by lactating Holstein-Friesian cows. *Animals*, 10, 2439. <https://doi.org/10.3390/ani10122439>
- *Kauffman, A. J., & St-Pierre, N. R. (2001). The relationship of milk urea nitrogen to urine nitrogen excretion in Holstein and Jersey cows. *Journal of Dairy Science*, 84(10), 2284–2294.
- *Kidane, A., Øverland, M., Mydland, L. T., & Prestløkken, E. (2018). Interaction between feed use efficiency and level of dietary crude protein on enteric methane emission and apparent nitrogen use efficiency with Norwegian Red dairy cows. *Journal of Animal Science*, 96(9), 3967–3982. <https://doi.org/10.1093/jas/sky256>
- Kim, J.-E., & Lee, H.-G. (2021). Amino acids supplementation for the milk and milk protein production of dairy cows. *Animals*, 11, 2118. <https://doi.org/10.3390/ani11072118>
- Kolver, E. S., & Muller, L. D. (1998). Performance and nutrient intake of high producing Holstein cows consuming pasture or a total mixed ration. *Journal of Dairy Science*, 81(5), 1403–1411. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(98\)75704-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(98)75704-2)
- *Lazzarini, Maria Belen. (2010). *Milk production and nitrogen partitioning in dairy cows grazing standard and high sugar perennial ryegrass with and without white clover, during spring and autumn*. Tesis de Maestría. Massey University, Palmerston North, New Zealand.
- McCarthy, K. M., Lynch, M. B., Pierce, K. M., Fahey, A. G., Gath, V. P., McDonald, M., ...& Mulligan, F. J. (2023). Rumen fermentation and forage degradability in dairy cows offered perennial ryegrass, perennial ryegrass and white clover or a multispecies forage. *Livestock Science*, 269, 105185. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2023.105185>
- Mirzaei-Alamouti, H., Mohammad, A., Vazirigohar, M., Rezamand, P., & Mansouryar, M. (2020). Effect of protein level and grain source on milk production, nutrient digestibility and ruminal fermentation in primiparous Holstein cows. *Journal of Agricultural Science*, 158(8–9), 767–773. <https://doi.org/10.1017/S0021859621000095>
- Minogue, C. T., Boland, T. M., Etxeberria, I., Walsh, N. A., Fahey, A. G., Dineen, M., & McKay, Z. C. (2025). The effect of including plantain (*Plantago lanceolata* L.) in perennial ryegrass and white clover pastures on milk production and nitrogen excretion of dairy cows throughout the grazing season. *Journal of Dairy Science*, 108, 8529–8547. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25966>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., Antes, G., Atkins, D., ...& Tugwell, P. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine*, 6, 7. Public Library of Science. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>

- *Morrison, S. J., & Patterson, D. C. (2007). The effects of offering a range of forage and concentrate supplements on milk production and dry matter intake of grazing dairy cows. *Grass and Forage Science*, 62, 332–345.
- *Müller, C. B. M., Görs, S., Derno, M., Tuchscherer, A., Wimmers, K., Zeyner, A., & Kuhla, B. (2021). Differences between Holstein dairy cows in renal clearance rate of urea affect milk urea concentration and the relationship between milk urea and urinary nitrogen excretion. *Science of the Total Environment*, 755, 143198. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143198>
- *Mutsvangwa, T., Davies, K. L., McKinnon, J. J., & Christensen, D. A. (2016). Effects of dietary crude protein and rumen-degradable protein concentrations on urea recycling, nitrogen balance, omasal nutrient flow, and milk production in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 99(8), 6298–6310. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-10917>
- *Nadeau, E., Englund, J., & Gustafsson, A. H. (2007). Nitrogen efficiency of dairy cows as affected by diet and milk yield. *Livestock Science*, 111, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2006.11.016>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Eighth Revised Edition. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25806>
- *O'Donovan, M., & Delaby, L. (2005). A comparison of perennial ryegrass cultivars differing in heading date and grass ploidy with spring calving dairy cows grazed at two different stocking rates. *Animal Research*, 54, 337–350. <https://doi.org/10.1051/animres:2005027>
- *Olmos C., J. J., & Broderick, G. A. (2006). Effect of dietary crude protein concentration on ruminal nitrogen metabolism in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 89(5), 1694–1703.
- *Pacheco, D., Lowe, K., Burke, J. L., & Cosgrove, G. P. (2009). Urinary nitrogen excretion from cows at different stage of lactation grazing different ryegrass cultivars during spring or autumn. *Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production*, 69, 196–200.
- *Pacheco, D., Burke, J. L., & Cosgrove, G. P. (2010). The effect of different methods of presenting ryegrass and white clover diets on nitrogen utilisation by cows. *Proceedings of the 4th Australasian Dairy Science Symposium*, 101–106.
- Powell, J. M., & Rotz, C. A. (2015). Measures of nitrogen use efficiency and nitrogen loss from dairy production systems. *Journal of Environmental Quality*, 44(2), 336–344. <https://doi.org/10.2134/jeq2014.07.0299>
- *Rafieei, H. (2011). Responses of milk urea nitrogen content to dietary rumen degradable protein level in lactating Holstein dairy cows. *Iranian Journal of Applied Animal Science*, 1(2), 111–116.

- *Reid, M., O'Donovan, M., Elliott, C. T., Bailey, J. S., Watson, C. J., Lalor, S. T. J., Corrigan, B., Fenelon, M. A., & Lewis, E. (2015). The effect of dietary crude protein and phosphorus on grass-fed dairy cow production, nutrient status, and milk heat stability. *Journal of Dairy Science*, 98(1), 517–531. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8437>
- *Rius, A. G., McGilliard, M. L., Umberger, C. A., & Hanigan, M. D. (2010). Interactions of energy and predicted metabolizable protein in determining nitrogen efficiency in the lactating dairy cow. *Journal of Dairy Science*, 93(5), 2034–2043. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1777>
- *Roseler, D. K., Ferguson, J. D., Sniffen, C. J., & Herrema, J. (1993). Dietary protein degradability effects on plasma and milk urea nitrogen and milk nonprotein nitrogen in Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 76(2), 525–534.
- Schwab, C. G., & Broderick, G. A. (2017). A 100-year review: Protein and amino acid nutrition in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 100(12), 10094–10112. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13320>
- Simoni, M., Goi, A., De Marchi, M., & Righi, F. (2021). The use of visible/near-infrared spectroscopy to predict fibre fractions, fibre-bound nitrogen and total-tract apparent nutrients digestibility in beef cattle diets and faeces. *Italian Journal of Animal Science*, 20(1), 814–825. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2021.1924884>
- Sucak, M. G., Serbester, U., & Görgülü, M. (2017). Effects of dietary starch and crude protein levels on milk production and composition of dairy cows fed high concentrate diet. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 5(6), 563–567. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v5i6.563-567.718>
- Štolcová, M., Bartoň, L., & Řehák, D. (2024). Milk components as potential indicators of energy status in early lactation Holstein dairy cows from two farms. *Animal*, 18, 101235. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101235>
- *Soder, K. J., Sanderson, M. A., Stack, J. L., & Muller, L. D. (2006). Intake and performance of lactating cows grazing diverse forage mixtures. *Journal of Dairy Science*, 89, 2158–2167.
- Souza, V. C., Gleason, C. B., Price, T. P., dos Reis, B. R., Sujani, S., Davis, T. C., Liebe, Douglas M., D., Kristy M., & White, R. R. (2025). Production responses of dairy cows to precision feeding based on historical performance during short-term changes in supplementation. *Journal of Animal Science*, 103, skaf317. <https://doi.org/10.1093/jas/skaf317>
- *Spek, J. W., Bannink, A., Gort, G., Hendriks, W. H., & Dijkstra, J. (2012). Effect of sodium chloride intake on urine volume, urinary urea excretion, and milk urea concentration in lactating dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 95(12), 7288–7298. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5688>

- Tang, Q., Shao, P., Wen, C., Bu, Z., Qin, G., Huang, Y., ...& Zou, C. (2025). Effects of dietary rumen-degradable protein on the growth performance, energy, and nitrogen metabolism of dairy buffalo heifers. *Tropical Animal Health and Production*, 57, 245. <https://doi.org/10.1007/s11250-025-04494-5>
- *Tas, B. M., Taweel, H. Z., Smit, H. J., Elgersma, A., Dijkstra, J., & Tamminga, S. (2005). Effects of perennial ryegrass cultivars on intake, digestibility, and milk yield in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 88(9), 3240–3248.
- *Tas, B. M., Taweel, H. Z., Smit, H. J., Elgersma, A., Dijkstra, J., & Tamminga, S. (2006). Effects of perennial ryegrass cultivars on milk yield and nitrogen utilization in grazing dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 89(9), 3494–3500.
- *Tas, B. M., Taweel, H. Z., Smit, H. J., Elgersma, A., Dijkstra, J., & Tamminga, S. (2006). Utilisation of N in perennial ryegrass cultivars by stall-fed lactating dairy cows. *Livestock Science*, 100, 159–168.
- Tamminga, S. (1992). Nutrition management of dairy cows as a contribution to pollution control. *Journal of Dairy Science*, 75(1), 345–357.
- *Taweel, H. Z., Tas, B. M., Smit, H. J., Elgersma, A., Dijkstra, J., & Tamminga, S. (2005). Effects of feeding perennial ryegrass with an elevated concentration of water-soluble carbohydrates on intake, rumen function and performance of dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, 121, 243–256. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.02.024>
- Tian, Z., Zhang, Y., Zhang, H., Sun, Y., Mao, Y., Yang, Z., & Li, M. (2022). Transcriptional regulation of milk fat synthesis in dairy cattle. *Journal of Functional Foods*, 96, 105208. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105208>
- *Totty, V. K., Greenwood, S. L., Bryant, R. H., & Edwards, G. R. (2013). Nitrogen partitioning and milk production of dairy cows grazing simple and diverse pastures. *Journal of Dairy Science*, 96, 141–149. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5504>
- *Wattiaux, M. A., & Karg, K. L. (2004). Protein level for alfalfa and corn silage-based diets: I. Lactational response and milk urea nitrogen. *Journal of Dairy Science*, 87(10), 3480–3491.
- *Wattiaux, M. A., & Karg, K. L. (2004). Protein level for alfalfa and corn silage-based diets: II. Nitrogen balance and manure characteristics. *Journal of Dairy Science*, 87(10), 3492–3502.
- *Whelan, S. J., Pierce, K. M., McCarney, C., Flynn, B., & Mulligan, F. J. (2012). Effect of supplementary concentrate type on nitrogen partitioning in early lactation dairy cows offered perennial ryegrass-based pasture. *Journal of Dairy Science*, 95(8), 4468–4477. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4689>
- *Yang, C. T., Ferris, C. P., & Yan, T. (2022). Effects of dietary crude protein concentration on animal performance and nitrogen utilisation efficiency at different stages of lactation in Holstein-Friesian dairy cows. *Animal*, 16(7). <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100562>

- Zhang, C., Liu, Y., Wang, J., Xing, L., Liu, L., Quan, Y., He, L., Zhang, L., Gao, T., Fu, T., Liu, K., & Lian, H. (2025). Fluctuations in dietary crude protein content affect rumen bacterial community and metabolome in Holstein dairy cows. *Frontiers in Veterinary Science*, 12, 1645129. <https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1645129>
- *Zhu, W., Fu, Y., Wang, B., Wang, C., Ye, J. A., Wu, Y. M., & Liu, J.-X. (2013). Effects of dietary forage sources on rumen microbial protein synthesis and milk performance in early lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 96, 1727–1734. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5756>
- Zelege, A. W., Dimonaco, N. J., Lawther, K., Lavery, A., Ferris, C. P., Moorby, J., & Huws, S. A. (2025). Reducing crude protein content in the diet of lactating dairy cows improved nitrogen-use-efficiency and reduced N excretion in urine, whilst having no obvious effects on the rumen microbiome. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 16, 113. <https://doi.org/10.1186/s40104-025-01240-7>