


Artículo de investigación

Huella hídrica y parámetros productivos en ganadería de leche de Boyacá, Colombia

Water footprint and production parameters in dairy cattle raising in Boyacá, Colombia

Emma Sofía Corredor Camargo  ¹,   ² y   ³

¹Estudiante Doctorado en Desarrollo Sostenible Universidad de Manizales, Docente Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Tunja, Colombia.

²Doctor en Ciencias Pedagógicas, Postdoctorado en Educación, Docente Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.

³Doctor en Desarrollo Sostenible, Docente Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Tunja, Colombia.

Recepción: 12-agosto-2024 **Aceptado:** 16-dic-2024 **Publicado:** 20-enero-2025

Cómo citar: Corredor Camargo, E. S. (2025). Huella hídrica y parámetros productivos en ganadería de leche de Boyacá, Colombia. *Ciencia en Desarrollo*, 16 (1). doi: 10.19053/uptc.01217488.v16.n1.2025.18012

Resumen

En las últimas décadas, el uso del agua en la ganadería ha sido un tema relevante en la discusión sobre sistemas alimentarios sostenibles y la competencia por el recurso hídrico. Esta investigación analizó la relación entre variables productivas y la huella hídrica en la producción primaria de leche en fincas a pequeña escala en la zona central del departamento de Boyacá. Se llevó a cabo un estudio cuantitativo y correlacional en 50 sistemas ganaderos cuyo principal objetivo es la producción de leche. Se calcularon los parámetros: porcentaje de hembras en ordeño, producción por área y por hembra, y carga animal. Se estimó la huella hídrica dividida en tres categorías: azul, verde y gris. Los datos fueron procesados por RStudio, se realizó el test de Shapiro-Wilk, el coeficiente de correlación de Spearman y análisis de regresión lineal múltiple. En los resultados se identificaron la Huella Hídrica Total (\bar{x} 1,01 m³/L), Huella Azul (\bar{x} 0,01 m³/L), Huella Verde (\bar{x} 0,19 m³/L) y Huella Gris (\bar{x} 0,81m³/L). Las variables Porcentaje de hembras, Productividad Kg/Hembra/año y Productividad Kg/Ha/año muestran los más altos coeficientes de correlación, siendo más fuertes con la Huella Azul. Se evidencia potencial para mejorar la sostenibilidad ambiental de la producción lechera mediante la adopción de prácticas eficientes, especialmente en el componente animal.

Palabras Clave: Agua - Bovinos- Cambio climático - Desarrollo sostenible - Impacto ambiental – Mitigación.

Abstract

In recent decades, water use in livestock production has emerged as a significant topic within the discourse on sustainable food systems and competition for water resources. This research examines the relationship between productive variables and the water footprint in primary milk production on small-scale farms in the central zone of the department of Boyacá. A quantitative and correlational study was conducted involving 50 livestock systems primarily focused on milk production. The following parameters were assessed: the percentage of milking females, production per area, production per female, and stocking rate. The water footprint was estimated and categorized into three distinct types: blue, green, and gray. Data analysis was performed using RStudio, incorporating the Shapiro-Wilk test, Spearman's correlation coefficient, and multiple linear regression analysis. The results revealed a Total Water Footprint of (\bar{x} 1.01 m³/L), a Blue Footprint of (\bar{x} 0.01 m³/L), a Green Footprint of (\bar{x} 0.19 m³/L), and a Gray Footprint of (\bar{x} 0.81 m³/L). The variables Percentage of Females, Productivity Kg/Female/Year, and Productivity Kg/Ha/Year exhibited the highest correlation coefficients, with the strongest correlation observed with the Blue Footprint. The findings suggest potential avenues for enhancing the environmental sustainability of dairy production through the implementation of efficient practices, particularly in relation to the animal component.

Keywords: Water - Cattle - Climate change - Sustainable development - Environmental impact - Mitigation.

1. Introducción

El aumento previsto de la demanda de proteínas es una retórica común en la literatura sobre nutrición sostenible. La importancia de la leche bovina en el suministro de aminoácidos indispensables biodisponibles representa aproximadamente el 12 % de todas las proteínas consumidas por la población mundial [1]. Para responder a la creciente demanda, según el informe de [2], se espera que la producción de leche crezca a una tasa del 1.5 % anual durante la próxima década y se proyecta que incrementará pasando de 580 a 1.043 millones de toneladas, del año 1999 al 2050. Sin embargo, la intensificación requiere el uso de recursos naturales, por ejemplo, la ganadería lechera ocupa el 7 % de la superficie mundial y para la alimentación de vacas lecheras se destinan 2.500 millones de toneladas de materia seca, lo que corresponde aproximadamente al 40 % de los alimentos destinados al ganado a nivel global [3].

El uso del agua en el sector ganadero es un factor que en las últimas décadas ha figurado en el debate sobre los sistemas alimentarios sostenibles y la competencia local por el recurso hídrico [4, 5]. En el contexto de la escasez mundial de agua y las preocupaciones por la seguridad alimentaria, la huella hídrica (HH) se está convirtiendo en un importante indicador de sostenibilidad en la agricultura y la alimentación. Sin embargo, la variabilidad sustancial en las estimaciones entre sistemas indica que se deben evitar las generalizaciones sobre el uso o contaminación del agua por parte del ganado y durante la generación de productos pecuarios [6, 7].

Es importante resaltar que la HH es un indicador que promueve el análisis del uso eficiente y la productividad del agua, comprendiendo la eficiencia, como la realización de un proceso o generación de un producto o servicio con la mínima cantidad de recurso posible (m^3 /unidad de producto), mientras que la productividad se entiende como la relación existente entre el volumen de la producción o el servicio, con la cantidad de agua utilizada (unidad de producto/ m^3), en términos generales se basa en la necesidad de producir una mayor cantidad de bienes y servicios con menos recurso hídrico, con el objetivo de otorgarle un uso equitativo y sustentable al mismo. Este indicador es multisectorial, geográfica y temporalmente explícito e incluye tanto el uso de agua directo como indirecto, pudiendo ser estimado para un proceso, producto, consumidor, grupo de consumidores o productor [8].

Este concepto de HH introducido por Hoekstra y Hung en el año 2002, tiene en cuenta además del volumen; el tiempo, el espacio y los tipos de agua dulce consumida, extraída o contaminada. Para la evaluación de la huella hídrica se realizan tres pasos: la cuantificación del volumen de agua consumida y contaminada; la evaluación de impactos que genera, en el que se analiza la importancia de este volumen en la región o el país y la toma de decisión con respecto a estos impactos [8], en tal sentido, la HH además del volumen considera el momento en el que el agua es extraída, si regresa o no al lugar de origen y su clasificación de acuerdo con su fuente. Para establecer los componentes específicos de la huella hídrica total (HHT), Hoekstra y colaboradores [8] realizaron una relación entre los usos directos e indirectos del

recurso hídrico y sus tres denominaciones, el color azul, verde y gris, la huella hídrica azul (HA) representa el consumo de los cuerpos de agua dulce superficial y subterránea, y se calcula con base en el agua evapotranspirada, la incorporada y la que no retorna al sistema. La huella hídrica verde (HV), se refiere al consumo de agua lluvia almacenada en el suelo y la vegetación. La huella hídrica gris (HG) se enmarca en el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminación al sobrepasar las concentraciones naturales de un lugar específico.

El objetivo de la investigación fue analizar la relación entre los parámetros productivos y la Huella Hídrica en la producción primaria de leche en fincas de alta montaña de la zona central del departamento de Boyacá, aplicando un estudio con enfoque cuantitativo, no experimental, de tipo descriptivo y correlacional, en el que se estimó la HH, a través, del enfoque de la Water Footprint Network [8], en 50 sistemas ganaderos cuyo principal objetivo es la producción de leche, ubicados en la zona central del departamento de Boyacá. Se determinaron las variables productivas (porcentaje de hembras en ordeño, productividad por hembra en ordeño y productividad por área) con más altos coeficientes de correlación de Spearman y se realizó un modelo de regresión lineal múltiple cumpliendo con los supuestos de normalidad, varianza constante y no autocorrelación. Como resultados se incluyen la determinación de la huella hídrica y la relación con parámetros productivos.

2. Materiales y métodos

2.1. Tipo de estudio

Se llevó a cabo un estudio con enfoque cuantitativo, no experimental, de tipo descriptivo y correlacional, en 50 sistemas ganaderos de alta montaña, ubicados en la zona central del departamento de Boyacá - Colombia, cuyo principal ingreso económico es la producción de leche. Los datos fueron recolectados de manera directa, a través, de encuestas a productores ganaderos seleccionados por muestreo no probabilístico discrecional. La caracterización de las fincas se realizó a través de observación e información primaria, y se agruparon según los componentes empleados en el desarrollo de sus actividades; con base en las siguientes categorías: composición de la ganadería, manejo del suelo y forraje, insumos utilizados y disposición de residuos. Se calcularon los parámetros productivos: porcentaje de hembras en ordeño (Porhembras), productividad de leche (ProductKg/año), productividad de leche por hembra en ordeño (ProductKg/Hembra/año), productividad de leche por área de pastoreo, (ProductKg/Ha/año) y Carga animal (UGG/Ha). Se empleó la metodología del enfoque de la Water Footprint Network [8] para la estimación de la Huella Hídrica. Posteriormente se realizó análisis de correlación y regresión lineal múltiple.

2.2. Lugar de estudio y muestra

Con el objetivo de lograr una zonificación homogénea, esta investigación se llevó a cabo en tres municipios con condiciones edafoclimáticas similares, caracterizados por la predominan-

cia de ganadería familiar campesina, enfocada principalmente en pequeñas producciones lecheras. La zona de estudio incluye los municipios de Soracá, Tunja y Siachoque, localizados en la provincia centro del departamento de Boyacá, Colombia. El municipio de Soracá está ubicado a 2.873 msnm, con una temperatura promedio de 14°C, precipitación promedio de 740 mm; el municipio de Tunja está ubicado a 2.690 msnm, con una temperatura promedio de 12.9°C y precipitación promedio de 655 mm, y el municipio de Siachoque está ubicado a 2.720 msnm, con una temperatura promedio de 13°C, precipitación promedio de 688 mm [9]. Desde la clasificación de zonas de vida de Holdridge corresponde a Bosque seco Montano Bajo (bs – MB), y en la clasificación Holdridge – IGAC corresponde a Frío seco [10].

De acuerdo con datos del Instituto Colombiano Agropecuario, las principales actividades agropecuarias de esta región incluyen la ganadería de pequeña escala y los cultivos transitorios. En 2023, se registraron 3.445 predios ganaderos en la zona de estudio, distribuidos de la siguiente manera: 30 % en Soracá, 25 % en Tunja y 45 % en Siachoque. La mayoría de estos predios (82 %) pertenecían a pequeños productores con menos de 50 cabezas de ganado [11].

Para la investigación, se seleccionaron 50 sistemas ganaderos mediante un muestreo no probabilístico discrecional, cumpliendo con tres criterios principales: primero, que los productores estuvieran de acuerdo en participar en el estudio y brindar información sobre sus predios; segundo, que su principal fuente de ingresos fuera la producción de leche; y tercero, que se tratara de pequeños productores con sistemas ganaderos de tipo familiar campesino, característicos de esta región del país.

2.3. Estimación de la Huella hídrica

La estimación se basó en el Manual de Evaluación de la Huella Hídrica [8]. Para calcular la HH verde directa, se utilizó el programa CROPWAT y el método FAO Penman-Monteith, considerando datos climáticos como temperatura, humedad, viento e insolación obtenidos de la estación meteorológica en Tunguavita, Paipa. En la estimación de la HH azul directa, se consideró el agua evaporada y el agua incorporada en la leche. La HH azul se calculó sumando el agua evaporada y el agua incorporada. La HH gris directa se estimó a partir del nitrógeno lixiviado de excretas y fertilizantes, según la Water Footprint Network. Para la HH indirecta, se consideró el suministro de alimento balanceado, basándose en la HH reportada para sus componentes principales. Las unidades funcionales analizadas fueron: operación de una unidad de producción primaria pecuaria con vocación en ganadería de leche para consumo humano. Los flujos de referencia fueron: (1) año de operación promedio de la finca y un (1) litro de leche.

2.4. Análisis estadístico

Después de determinar los parámetros productivos y estimar la HH y discriminada en la HV, HA y HG, para cada una de las variables dispuestas se realizó el Test de Shapiro

Wilk. Se determinó que las HH y gran parte de las variables predictoras no se ajustaron a una distribución normal, por tanto, se aplicó el coeficiente de correlación de eSpearman. Se ensayaron modelos para las HH y se seleccionaron las variables productivas porcentaje de hembras en ordeño (Porhembras), productividad de leche por hembra en ordeño (ProductKg/Hembra/año), productividad de leche por área de pastoreo, (ProductKg/Ha/año) con más altos coeficientes de correlación de Spearman (95 % de confianza). Se validaron los supuestos de normalidad con el Test de Shapiro Wilk, el de varianzas constante y Durbin Watson y se determinó que el modelo de regresión lineal múltiple cumple con los supuestos de normalidad, varianzas constante y no autocorrelación.

A continuación, se describe el modelo de regresión lineal múltiple con transformación logarítmica natural:

$$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \epsilon \quad (1)$$

Donde: - $\ln(y)$: Transformación logarítmica natural de la variable dependiente y .

- β_0 : Intercepto del modelo.

- β_1 : Coeficiente de la primera variable independiente x_1 .

- β_2 : Coeficiente de la segunda variable independiente x_2 .

- ϵ : Término de error o residual.

3. Resultados

3.1. Estimación de la Huella hídrica

La huella hídrica total (tabla 1) indica que, en promedio, se utilizan 1,01 m³ de agua para producir 1 litro de leche. Adicionalmente, muestra una gran variabilidad con desviación estándar y varianzas altas, lo que sugiere que los procesos o prácticas de producción son bastante diversos. Los valores extremos y la diferencia entre el mínimo y el máximo (1,42 m³/L) es significativa, mostrando que hay una gran variabilidad en la huella hídrica total, lo que puede indicar la presencia de procesos muy diferentes en términos de uso o contaminación de agua.

Tabla 1: Estimación de la Huella Hídrica.

	Huella hídrica total m ³ /L	Huella azul m ³ /L	Huella verde m ³ /L	Huella gris m ³ /L
Media	1,01	0,01	0,19	0,81
Error típico	0,06	0,00	0,05	0,67
Mediana	0,96	0,01	0,19	0,76
Moda	0,33	0,01	0,19	0,13
Desviación estándar	0,48	0,01	0,03	0,47
Varianza de la muestra	2,37	0,00	0,01	2,27
Curtosis	-0,13	0,06	0,55	-0,13
Coefficiente de asimetría	0,01	0,11	0,10	0,02
Rango	1,42	0,002	0,18	1,42
Mínimo	0,33	0,00	0,11	0,13
Máximo	1,75	0,002	0,30	1,56
Cuenta	50	50	50	50

Fuente: los autores.

La huella azul en los resultados obtenidos (0,01 m³/L) es baja y consistente en el conjunto de datos. Esto sugiere que el agua superficial y subterránea no es un componente significativo del total de la huella hídrica. Con una desviación estándar

y varianza casi nulas, así como un rango muy reducido, los datos de HA no presentan una variabilidad significativa. Esto sugiere que el uso de agua azul es muy uniforme a través de las observaciones.

La Huella verde identificada indica que, en promedio, se utilizan 0,19 m³ de agua verde para producir 1 litro de leche. Este valor representa una cantidad significativa en comparación con la HA, pero menor que la huella gris. La media nos da una visión general del impacto del agua verde en la producción, reflejando que esta fuente contribuye de manera considerable al uso total de agua. Aunque hay una variabilidad moderada en los datos, con una desviación estándar de 0,03 m³/L, los datos no son extremadamente dispersos. Sin embargo, el rango de 0,18 m³/L muestra que existen diferencias notables entre los valores más bajos y altos.

La huella gris representa una parte importante del uso total de agua, con media de 0,81 m³/L que indica un impacto considerable en términos de agua necesaria para diluir la contaminación. La alta desviación estándar y varianza, junto con un amplio rango, reflejan una considerable variabilidad en los datos. Esto indica que hay procesos muy diversos en términos de HG. La curtosis negativa y la ligera asimetría positiva sugieren que la mayoría de los datos están concentrados cerca de la media, pero también hay una cola de valores más altos que afecta la distribución. La diferencia entre el valor mínimo y máximo muestra que hay una amplia variabilidad en la HG, con algunos procesos utilizando mucha más agua para diluir contaminantes que otros.

Tabla 2: Identificación de 116 aislamientos de *R. solani* procedentes de las localidades de Túquerres y Pasto (Nariño), por secuenciación con marcadores ITS (Espacio Interno Transcripto), número de accesión y porcentaje de similitud (según GenBank).*

Modelo	Intercepto	Coefficiente de Porcentaje hembras ordeño	Coefficiente de Productividad Kg/hembra en producción/año	Coefficiente de Productividad L/Ha	Probabilidad (p-valor)	Coefficiente de Determinación (R ²)
HHT	17.63	-1.235	-8.319	1.42	<0.05	0.132
HA	0.021	-1.510	-9.20	-7.26	<0.05	0.144
HV	2.123	4.591	-1.596	-2.341	<0.05	0.183
HG	15.66	-12.84	-0.0008	0.00003	<0.05	0.159

HHT: Huella Hídrica Total; HA: Huella Hídrica Azul; HV: Huella Hídrica Verde y HG: Huella Hídrica Gris.
Fuente: autores

El modelo de la HV muestra un coeficiente bajo, R² de 0,18. Sin embargo, por cada unidad adicional en Porhembra, HV aumenta en 4,59 unidades. Relación positiva notable, indicando que Porhembra tiene un efecto significativo en HV, mientras que las otras variables tienen efectos más débiles. Por cada unidad adicional en Porhembra, HG disminuye en 12,84 unidades. Relación negativa muy fuerte, indicando que esta variable tiene un gran impacto en HG. Sin embargo, al igual que en los modelos para las demás huellas hídricas el coeficiente de determinación es bajo.

5. Discusión

El análisis realizado sobre la relación entre la producción de leche y la huella hídrica resalta importantes hallazgos sobre cómo las prácticas de producción pueden influir en el uso

4. Variables productivas vs Huella de Hídrica estimada

Las variables enmarcadas en la eficiencia productiva: Porcentaje de hembras en ordeño, Productividad Kg/hembra en producción/año, y Productividad L/Ha tienen correlaciones negativas (Figura 1) con todas las huellas hídricas, siendo más fuerte con HA. La variable de productividad Kg/año tiene correlaciones negativas con todas las clasificaciones de las huellas hídricas, pero estas correlaciones son débiles. Mientras que la carga animal solamente muestra correlación negativa con la HV y resulta positiva y más fuerte con HA.

Al desarrollar el modelo de HHT se evidencia (tabla 2), un R² de 0,132, indicando que solo el 13.2% de la variabilidad en esta huella se explica por las variables Porcentaje de hembras en ordeño, Productividad Kg/hembra en producción/año, y Productividad L/Ha. Los coeficientes negativos de las variables independientes sugieren que, aunque no estadísticamente significativos, hay una tendencia hacia una relación inversa con HHT. Por cada incremento de una unidad en Porhembra, manteniendo las otras variables constantes, se espera que HHT disminuya en aproximadamente 12,3 unidades, mientras que las otras variables tienen un efecto mínimo.

Con respecto al modelo de HA también tiene un R² bajo, de 0,14. Esto indica que las variables independientes no son buenos predictores de HA. Por cada unidad adicional en Porhembra, se espera que HA disminuya en 0.01 unidades. Es el coeficiente más relevante del modelo, indicando una relación negativa más notable. Sin embargo, al igual que los demás, los efectos son relativamente pequeños.

y manejo de los recursos hídricos. Es importante destacar que diversos factores, como la composición de los alimentos balanceados, la raza del ganado y las prácticas de producción, pueden influir en la huella hídrica de la leche bovina [12]. Sin embargo, el alcance de este estudio se enfocó en la relación entre la producción de leche y la huella hídrica, y los resultados sugieren que, a mayor producción, se observa una disminución en el consumo y contaminación de agua. Estos hallazgos no solo reflejan el estado actual de la producción lechera, sino que también ofrecen perspectivas sobre prácticas que pueden reducir el consumo y contaminación del agua, a la par del mejoramiento de la eficiencia productiva.

Con respecto al consumo del agua en estudios como el de Mekonnen y Hoekstra [5] los datos indican que la mayor parte de la huella hídrica proviene del agua verde, reflejan-

do el uso de agua lluvia para la producción de cultivos de forraje, los investigadores estimaron que la producción de un litro de leche requiere un promedio de 1,020 litros de agua, con el 90 % del uso relacionado con la producción de forraje. Dicho porcentaje es similar al identificado por Heinke y colaboradores [13], quienes indican que se requieren 4.387 km³ de agua para producir el alimento que consume el sector ganadero mundial, de los cuales el 94 % es agua verde y existen oportunidades para aumentar la productividad del agua para el ganado para todos los tipos de ganado, pero son particularmente grandes para los rumiantes.

La intensiva demanda de agua en la producción lechera es destinada de manera directa a los cultivos forrajeros, al suministro de agua potable para consumo del ganado, las operaciones de saneamiento, incluida la higiene animal y la limpieza de las instalaciones, y la recogida y el transporte de residuos, entre otros procesos [8], en consecuencia, la huella verde estimada en las fincas del presente estudio muestra la posibilidad de identificar estrategias de mitigación relacionadas con estos aspectos de uso de agua. Se requiere una gestión de los cultivos orientada a mejorar la eficiencia hídrica mediante la reducción de la evaporación del agua del suelo, transformándola en transpiración que favorece el crecimiento de la biomasa. Esto se logra mediante el manejo de los residuos de cultivos para mantener la capacidad de infiltración y retención de agua del suelo, especialmente a través, de sistemas de labranza cero o reducida. Además, el uso de cultivos de cobertura puede mejorar la eficiencia hídrica al limitar la evaporación del suelo desnudo y fomentar la transpiración de las plantas [14].

De acuerdo con los resultados presentados por Heinke y colaboradores [13] el agua azul contribuye solo con un 6 % del consumo total, este bajo porcentaje es consistente con los hallazgos del presente estudio, sin embargo, cabe resaltar lo indicado por Mekonnen y Hoekstra [5] referente a que la escasez de agua azul en ciertas regiones puede aumentar la dependencia de fuentes de agua superficiales y subterráneas, de allí la importancia de que la estimación de los colores del agua consumida se interprete acorde al contexto local, en este caso el enfoque de las estrategias de mitigación se deberían enfocar en la huella verde, de tal manera que el uso sea eficiente y aspectos como el reciclaje permitan promover la autosuficiencia, la oferta constante.

Además del uso directo, es importante destacar que la eficiencia en el uso del recurso hídrico de los rumiantes está dominada principalmente por las variaciones en la eficiencia del uso de alimento y puede mejorarse optimizando la dieta del ganado y mejorando la gestión de los recursos para la producción y el transporte de los alimentos [13], adicionalmente, en relación con la alimentación es importante resaltar que una dieta adecuada y bien balanceada no solo mejora la producción lechera, sino que también reduce el consumo de agua, al mejorar este aspecto no solo se influye de manera positiva en el uso de agua verde sino que tendría un gran impacto en el agua azul debido a que el alimento es responsable del 98 % del uso total de agua azul para la producción animal mundial [15].

En lo que respecta al volumen de agua dulce que se requiere

para asimilar la carga de contaminación, en el presente estudio la huella gris tiene una gran relevancia, por lo que la implementación de tecnologías avanzadas, como sistemas de gestión de estiércol, y prácticas de reciclaje de agua, puede disminuir notablemente la huella hídrica. Según lo identificado por Ridoutt *et al.* [16], la adopción de tecnologías de eficiencia hídrica ha demostrado reducir la huella hídrica en un 20-30 % en fincas que implementaron tales sistemas.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos revelan que la producción de leche tiene una relación con la huella hídrica, y que, a través de la implementación de prácticas que mejoren la eficiencia productiva, se puede lograr una reducción que, aunque no es estadísticamente significativa si resulta considerable en el uso de agua. La adopción de tecnologías eficientes, combinada con prácticas como labranza cero, cultivos de cobertura y reciclaje de agua, entre otros y una mayor conciencia y educación entre los productores, puede conducir a un sector lechero más sostenible y resiliente.

En todos los modelos, el porcentaje de hembras en ordeño parece tener un impacto significativo, generalmente negativo, en la huella hídrica. Esto indica que la proporción de hembras es un factor crítico que se relaciona especialmente con la huella gris, aspecto de gran relevancia y que sería importante analizar con mayor profundidad en estudios futuros debido a que este parámetro se relaciona con la organización del sistema, con la capacidad de carga animal, con aspectos de mejoramiento genético, con el suministro de alimento balanceado, entre otros.

Los modelos muestran en general una capacidad explicativa limitada, lo que sugiere que podrían existir otras variables importantes que no están incluidas, seguramente relacionadas de forma directa con el alimento. Podría ser beneficioso considerar la inclusión de nuevas variables para profundizar en las estrategias de mitigación específicas para este tipo de sistemas de producción de leche.

Contribución de la autoría

Primer autor: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura, borrador original. Segundo autor: supervisión, conceptualización, escritura, revisión y edición. Tercer autor: conceptualización, borrador original, revisión y edición.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia y a la Universidad de Manizales por sus contribuciones en el proceso metodológico desarrollado en el presente manuscrito, como parte del proyecto titulado "Relación entre parámetros productivos y huellas ambientales en ganadería de leche en ecosistema alto andino".

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- [1] N. W. Smith, A. J. Fletcher, J. P. Hill, L. A. Dave, and W. C. McNabb, "Use of the DELTA model to understand the food system and global nutrition," *J. Nutr.*, vol. 151, pp. 3253–3261, 2021. <https://doi.org/10.1093/jn/nxab199>
- [2] OECD/FAO, *Perspectivas Agrícolas 2023–2032*, OECD Publishing, Paris, 2023. <https://doi.org/10.1787/2ad6c3ab-es>
- [3] J. P. Hill, "Assessing the overall impact of the dairy sector," in *Achieving Sustainable Production of Milk. Volume 2*, N. van Belzen, Ed. Cambridge, UK: Burleigh Dodds Science Publishing, pp. 291–314, 2017.
- [4] A. K. Chapagain and A. Y. Hoekstra, *Water Footprints of Nations: Volume 1 – Main Report, Value of Water Research Report Series No. 16*, UNESCO-IHE, 2004.
- [5] M. M. Mekonnen and A. Y. Hoekstra, "A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 14, no. 7, pp. 1259–1276, 2010.
- [6] B. G. Ridoutt, S. R. O. Williams, S. Baud, S. Fraval, and N. Marks, "The water footprint of dairy products: Case study involving skim milk powder," *J. Dairy Sci.*, vol. 93, no. 11, pp. 5114–5117, 2010. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3546>
- [7] M. A. Thomassen, R. Dalgaard, R. Heijungs, and I. de Boer, "Attributional and consequential LCA of milk production," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 13, no. 4, pp. 339–349, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0007-y>
- [8] A. Y. Hoekstra, A. K. Chapagain, M. M. Aldaya, and M. M. Mekonnen, *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*, 1st ed., 2011. <https://doi.org/10.4324/9781849775526>
- [9] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), *Normales Climatológicas Estándar: Periodo 1991–2020*. Bogotá, Colombia: IDEAM, 2021. Available: <http://archivo.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>
- [10] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), *Atlas Climatológico de Colombia*. Bogotá, Colombia: IDEAM, 2005.
- [11] Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), *National Livestock Censuses, May 2024*. Available: <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>
- [12] O. Alqaisi and E. Schlecht, "Feeding models to optimize dairy feed rations in view of feed availability, feed prices and milk production scenarios," *Sustainability*, vol. 13, no. 1, p. 215, 2020. <https://doi.org/10.3390/su13010215>
- [13] J. Heinke, M. Lannerstad, D. Gerten, P. Havlík, M. Herrero, A. M. O. Notenbaert, et al., "Water use in global livestock production—opportunities and constraints for increasing water productivity," *Water Resour. Res.*, vol. 56, no. 12, 2020. <https://doi.org/10.1029/2019WR026995>
- [14] G. Grossi, A. Vitali, and N. Lacetera, "Impact of summer cooling management on milk water footprint in dairy cows," *J. Clean. Prod.*, vol. 367, p. 133062, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133062>
- [15] A. Naranjo, A. Johnson, H. Rossow, and E. Kebreab, "Greenhouse gas, water, and land footprint per unit of production of the California dairy industry over 50 years," *J. Dairy Sci.*, vol. 103, no. 4, pp. 3760–3773, 2020. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16576>
- [16] B. G. Ridoutt, P. Sanguansri, M. Freer, and G. S. Harper, "Water footprint of livestock: comparison of six geographically defined beef production systems," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 17, pp. 165–175, 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-011-0346-y>