

Análisis de estacionalidad, correlaciones y modelos de regresión entre parámetros de calidad composicional e higiénica de la leche bovina en Agropecuaria Aliar – La Fazenda

Yurani Carolina Santisteban Gallo

Trabajo de grado para Optar el Título de Zootecnista

Directora

Luisa Fernanda Morales Mendoza

PhD (c). Biología Molecular y Biotecnología MsC. Zoot.

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia – IPRED

Programa de Zootecnia

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Agradezco profundamente a Dios por ser mi guía, mi fortaleza y el motor de mi vida. Gracias por poner en mi ser la sabiduría necesaria para afrontar los desafíos, por renovar mis fuerzas cuando sentía desfallecer y por permitirme llegar a esta meta con la satisfacción del deber cumplido. Sin su presencia constante, este camino no habría sido posible.

A mi madre, Adriana Gallo Álvarez. Mi principal motivo y mi más grande ejemplo de superación; por enseñarme que con esfuerzo y determinación no hay sueños inalcanzables. Tu amor incondicional ha sido el refugio donde siempre encontré la motivación para seguir adelante; este logro es, ante todo, el fruto de tus sacrificios.

A mi padre Emerson Antonio Santisteban Araque y mi hermana Laura Gissela Santisteban Gallo, por su apoyo silencioso pero constante, este logro también les pertenece.

A mis padrinos Heyver Carrillo y Teresa Blanco, por brindarme su cariño inquebrantable. Gracias por estar presentes en los momentos críticos y por ayudarme a superar cualquier obstáculo con sus consejos y confianza en mi talento. Su presencia ha sido una bendición en mi formación personal y profesional

Gracias por poner un granito de arena en este camino de aprendizaje, jamás se me podrá borrar del corazón la fé que pusieron en mí aún cuando fallar estaba en la lista de posibles hasta conseguir el triunfo final.

Yurani Carolina Santisteban Gallo

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a DIOS y mi familia, de manera primordial a mi madre, quien ha sido el pilar fundamental de mi vida, por creer en mis capacidades incluso cuando yo dudaba de ellas y por ser el motor que me impulsó a culminar esta etapa profesional. Tu amor, oraciones y sacrificio son la base de cada uno de mis éxitos.

A mis compañeros de estudio, por las largas jornadas de trabajo, por el intercambio constante de conocimientos y por hacer de este proceso una experiencia llena de aprendizaje y apoyo mutuo; Diego Baez, Ricardo Sepúlveda, Javier Cáceres, Jhon Hernández, Jesús Blanco, Javier Sepúlveda; su amistad la llevo en la parte del alma donde no se borran nunca los buenos momentos, gracias por las risas en medio del estrés y por ser mi segunda familia en las aulas.

A mi mejor amiga, Juliana Ortega, por caminar de la mano en este camino largo pero lleno de mucho aprendizaje; por sus palabras de aliento en medio del caos, por su apoyo insaciable y por estar a mi lado en todo momento. Sin su amistad este proceso habría sido mucho más difícil.

Por último, pero no menos importante a mi directora de tesis, PhD. Luisa F Mendoza Morales, por su guía excepcional y su paciente entrega a lo largo de este proyecto. Agradezco profundamente su disposición para orientarme, especialmente ante los obstáculos que surgieron en el camino hacia la culminación de este trabajo. Su rigor académico, su comprensión y su apoyo constante fueron la pieza clave para convertir este esfuerzo en una realidad.

Tabla de contenido

Introducción.....	10
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo general	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
2. Marco Teórico	14
2.1 Sector bovino	14
2.2 Importancia de la ganadería de leche en Colombia	14
2.3 Importancia de la calidad de la leche	16
2.4 Calidad composicional de la leche	16
2.5 Calidad higiénico-sanitaria de la leche	18
2.6 Entorno y estación.....	19
3. Metodología.....	20
3.1 Área de estudio	20
3.2 Muestreo y caracterización.....	20
3.3 Análisis de relaciones y correlaciones.....	22
3.4 Modelado predictivo y validación.....	23
4. Resultados	23
4.1 Estacionalidad	24
4.2 Análisis de correlación.....	32
5. Análisis de regresión	35
6. Discusión.....	41
7. Conclusiones.....	45

Referencias bibliográficas 46

Lista de Figuras

<i>Figura 1. Precipitación y volumen de producción en meses de estudio</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2. Calidad composicional</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3. Calidad higiénica</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4. Relación RCS y Score Lineal</i>	<i>29</i>
<i>Figura 5. Parámetros metabólicos de la hembra evaluados en la leche</i>	<i>30</i>
<i>Figura 6. Gráfico de producción y promedio</i>	<i>31</i>
<i>Figura 7. DEL y producción / vaca</i>	<i>31</i>
<i>Figura 8. Matriz de correlación entre parámetros productivos composicionales, metabólicos e higiénicos en vacas Girolando durante 2025</i>	<i>33</i>

Lista de Tablas

<i>Tabla 1. Límites de Recuento de bacterias por región.....</i>	18
<i>Tabla 2. Medidas resumen.....</i>	24
<i>Tabla 3. Parámetros estimados del modelo de regresión, significancia estadística de los predictores para BHB</i>	36
<i>Tabla 4: Parámetros estimados del modelo de regresión, significancia estadística de los predictores del MUN.....</i>	39

Resumen

Título: Análisis de Estacionalidad, Correlaciones y Modelos de Regresión Entre Parámetros de Calidad Composicional e Higiénica de la Leche Bovina en Agropecuaria Aliar – La Fazenda*

Autor: Yurani Carolina Santisteban Gallo**

Palabras claves: Calidad composicional, estacionalidad climática, producción, lechería

Descripción:

La producción lechera especializada de trópico bajo Colombiano, específicamente en la región de la Orinoquía, enfrenta desafíos determinantes impuestos por la marcada estacionalidad climática. En este contexto, la presente investigación surge de la necesidad de comprender como los periodos críticos de precipitación y sequía alteran el equilibrio fisiológico, sanitario y productivo de un hato Girolando en Agropecuaria Aliar – La Fazenda, un entorno donde la temperatura y humedad relativa fluctúan drásticamente, alcanzando niveles críticos de estrés calórico en el transcurso del tiempo. Partiendo de la premisa de que la gestión de un sistema ganadero no puede fundamentarse en supuestos, sino en la interpretación técnica de datos reales, este estudio se justifica en la urgencia de mitigar la vulnerabilidad del sistema ante factores ambientales externos.

Por tanto, el análisis sistemático de los parámetros de calidad e indicadores productivos aquí expuestos constituye la herramienta más robusta para garantizar la sostenibilidad y competitividad de la lechería especializada regional. Los resultados de este trabajo proveen una base científica fundamental para el diseño de estrategias de manejo que permitan al sistema productivo adaptarse proactivamente al cambio climático en lugar de ser una víctima de este, haciendo un énfasis riguroso en el comportamiento del hato durante periodos determinados de invierno, verano y transición estacional.

* Trabajo de Grado

** Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED. Programa de Zootecnia.

Directora: Luisa Fernanda Morales Mendoza. PhD en Biología Molecular y Biotecnología. MsC.

Zoot

Abstract

Title: Analysis of Seasonality, Correlations and Regression Models Between Compositional and Hygienic Quality Parameters of Bovine Milk at Agropecuaria Aliar - La Fazenda*

Author: Yurani Carolina Santisteban Gallo**

Keywords: Compositional quality, climatic seasonality, production, dairy

Description:

Specialized dairy production in the Colombian lowlands, specifically in the Orinoquía region, faces significant challenges imposed by the marked climatic seasonality. In this context, the present research arises from the need to understand how critical periods of precipitation and drought alter the physiological, health, and productive balance of a Girolando herd at Agropecuaria Aliar – La Fazenda, an environment where temperature and relative humidity fluctuate drastically, reaching critical levels of heat stress over time. Based on the premise that the management of a livestock system cannot be based on assumptions, but rather on the technical interpretation of real data, this study is justified by the urgent need to mitigate the system's vulnerability to external environmental factors.

Therefore, the systematic analysis of the quality parameters and production indicators presented here constitutes the most robust tool to guarantee the sustainability and competitiveness of specialized dairy farming in the region. The results of this work provide a fundamental scientific basis for the design of management strategies that allow the production system to proactively adapt to climate change instead of being a victim of it, with a rigorous emphasis on the behavior of the herd during specific periods of winter, summer and seasonal transition.

* Thesis

** Institute for Regional Outreach and Distance Education (IPRED). Animal Science Program.

Director: Luisa Fernanda Morales Mendoza. PhD in Molecular Biology and Biotechnology. MSc in Animal Science

Introducción

Dentro de los sistemas de producción láctea, diversos factores influyen en la calidad y composición de la leche, además de generar fluctuaciones en la producción. En la mayoría de las situaciones se llega a generar una baja calidad de la leche por diferentes factores ambientales, los cuáles interfieren de forma negativa en la industria debido a que genera directamente poca aceptación del producto y un bajo rendimiento en cuanto al procesamiento de este. Comprender los factores que afectan la composición de la leche y su posterior procesabilidad ha tomado un creciente interés. La necesidad de maximizar la eficiencia del proceso y la uniformidad del producto ha creado un impulso de investigación para comprender los cambios en la composición de la leche a lo largo de la lactancia (Timlin et al., 2021).

La producción láctea a nivel nacional es una de las principales actividades económicas del sector agropecuario, además de representar el sustento para las diferentes familias y personas que se dedican a esta actividad. En las distintas regiones del país se concentran diferentes variedades estacionales que llegan a aumentar o disminuir la calidad de la leche. Se ha identificado que un alto grado de estrés calórico tiene una relación directa con la producción de leche, el crecimiento, la ingesta de alimento, la eficiencia reproductiva y la incidencia de enfermedades de los animales (Biswal et al., 2020).

Según Hayes et al. (2023), su estudio evidencia un cambio significativo en la composición de la leche desde 2012 y destaca el efecto que los cambios estacionales, como el clima y el crecimiento de la hierba tienen sobre la composición de la leche de los sistemas basados en pastos. Resalta que predecir la composición de la leche en diferentes etapas de la lactancia beneficia a los procesadores al optimizar la logística de suministro y procesos

relacionados con la elaboración de productos lácteos. Esto se puede ver representado en las diferentes regiones productoras lácteas a nivel nacional, pues son factores determinantes en la productividad de la leche.

En Colombia existen dos estacionalidades muy marcadas que generan variaciones en la alimentación de los animales, la temperatura y humedad, que a su vez provocan fluctuaciones en la cantidad y calidad de leche que se obtiene en estas temporadas. Por ejemplo, “El contenido de proteínas de las leches de verano e invierno estadísticamente no mostraron ninguna diferencia significativa ($p > 0,05$), sin embargo, la cantidad de la proteína contenida en la leche de verano fue mayor que la leche de invierno, ya que sus cantidades en las leches de verano e invierno suelen variar en volumen y composición” también se tiene que “el contenido de grasa no solo afecta directamente el valor nutricional del producto, sino que también tiene efecto sobre propiedades sensoriales como el sabor y el aroma. Además, la calidad de los productos lácteos como el queso, la mantequilla y la nata dependen en gran medida de la cantidad y calidad de la grasa contenida en la leche original” (Nateghi et al., 2014).

En la región llanera de Colombia existen producciones lácteas de diferentes tamaños, desde las grandes producciones con miles de cabezas de ganado hasta las producciones con menos de cien cabezas de ganado, generando así diferentes cantidades y calidades de leche para el consumo, comercialización y procesamiento, que, adicionalmente pueden verse afectados por los diferentes climas presentados a lo largo del año. Asimismo, en producciones ganaderas lecheras del departamento del Meta, los animales son expuestos a condiciones que no siempre cumplen con los niveles de confort ni con los requerimientos esenciales que permiten garantizar su bienestar. En estos sistemas se evidencia que los animales se encuentran expuestos a métodos regulados y específicamente tratados con exigencia para asegurar así la productividad.

La temperatura oscila entre 20 y 43°C y la humedad relativa desde 75 hasta 87%. Estos factores influyen directamente en la producción y calidad de la leche. Desde la implementación de este sistema lechero de trópico bajo se han encontrado variaciones significativas en datos de producción y calidad en épocas secas y de lluvia las cuales resultan ser un indicador clave a analizar el cual no se ha tenido en cuenta en estudios anteriores para su análisis y significancia en modelos estadísticos que podrían resultar predictivos. Este comportamiento puede atribuirse a variaciones asociadas a la disponibilidad y calidad de los forrajes utilizados para el pastoreo, especialmente durante la estación seca (diciembre-marzo) cuando el déficit hídrico limita severamente la producción y calidad de biomasa del forraje, lo cual, impide satisfacer los requerimientos nutricionales del animal y a su vez afecta el volumen y la calidad de la leche (niveles de grasa y proteína) (Vélez et al., 2023).

Teniendo en cuenta todo lo descrito anteriormente se planteó la siguiente pregunta de investigación ¿La estacionalidad está directamente relacionada con la calidad composicional e higiénica de la leche bovina en la Agropecuaria Aliar- La Fazenda? ¿Se puede decir que la relación entre factores climáticos y calidad de leche son muy fuertes debido a diferentes factores como lo son la disponibilidad de alimentación, retos termodinámicos de humedad o sequía y factores como la mastitis ocasionando baja composición en la leche en diferentes estaciones del año?

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar la estacionalidad y la relación entre los parámetros de calidad composicional e higiénica de la leche bovina en **Agropecuaria Aliar – La Fazenda**, mediante análisis de correlación y modelos de regresión.

1.2 Objetivos específicos

Analizar la variación estacional de los parámetros de calidad composicional e higiénica de la leche bovina en Agropecuaria Aliar – La Fazenda.

Determinar las correlaciones entre los parámetros composicionales e higiénicos de la leche bovina en Agropecuaria Aliar – La Fazenda.

Analizar modelos de regresión que permitan identificar los factores composicionales que explican la variación en la producción de leche.

2. Marco Teórico

2.1 Sector bovino

Colombia se caracteriza por una notable presencia del sector bovino, con una población que se distribuye en 638,941 predios y suma un total de 29,194,104 animales. Sin embargo, se ha observado una reducción del 1.5% en comparación con 2023 (ICA, 2024). Este sector resulta fundamental para muchas regiones del país, ya que no solo genera empleo y dinamiza la economía rural, sino que también proporciona productos de alta calidad a las mesas de los colombianos y del mundo. Entre las razas bovinas más representativas en Colombia destacan el Brahman, el Holstein, el Normando y el Jersey, las cuales, se destacan por su gran relevancia en la producción de carne y leche (Asoregan, 2022).

2.2 Importancia de la ganadería de leche en Colombia

La producción lechera representa un componente relevante del sector agropecuario colombiano, al aportar al PIB agropecuario y generar empleo rural. En regiones lecheras, esta actividad no solo implica producción de alimentos, sino también ingresos para pequeños, medianos y grandes productores (Barragán & Martínez, 2016).

De acuerdo con la Federación Colombiana de Ganaderos (FEDEGAN, 2020), la ganadería lechera moviliza a cientos de miles de familias campesinas, muchas bajo esquemas de economía familiar, lo que la convierte en una base para el desarrollo rural. Asimismo, la leche constituye una fuente importante de proteínas, calcio y otros nutrientes esenciales, contribuyendo directamente a la seguridad alimentaria y nutricional del país (Castro & Bolívar, 2015). Al

garantizar una oferta interna estable de lácteos, se reduce la dependencia de importaciones y se fortalecen los mercados locales (Barragán & Martínez, 2016).

Aunque la ganadería de leche tiene gran importancia, enfrenta desafíos estructurales, entre ellos, se destacan los costos de producción elevados, especialmente en la alimentación de los hatos especializados (Mora & Salazar, 2012). Otros problemas están asociados con infraestructura deficiente, dificultades en transporte, conservación de la leche y acceso a servicios básicos de asistencia técnica y sanidad (Rincón & Torres, 2019).

Los sistemas de doble propósito, comunes en regiones tropicales, tienden a ser menos eficientes por unidad de área, lo que genera presiones sobre los recursos naturales. En contraste, los sistemas especializados, aunque más productivos, demandan mayor cantidad de insumos, generando también impactos ambientales (Castro & Bolívar, 2015).

En las últimas décadas, la producción de leche en Colombia ha mostrado un crecimiento sostenido gracias a avances en genética, nutrición e infraestructura, aunque la adopción de estas mejoras es desigual entre productores (Barragán & Martínez, 2016). Por otra parte, se ha incrementado el interés en mejorar la calidad e inocuidad del producto, lo que repercute en la salud pública y en el acceso a mejores mercados (Rincón & Torres, 2019).

Desde un enfoque teórico, la ganadería lechera es concebida como un motor de desarrollo rural, al generar efectos multiplicadores en la economía (empleo, transporte, comercialización e industria láctea), incrementar la resiliencia económica de las familias rurales y aportar al ordenamiento productivo del territorio. Asimismo, es un elemento clave en la seguridad alimentaria del país debido a su capacidad de producción continua y su relevancia en la dieta humana (FEDEGAN, 2020).

2.3 Importancia de la calidad de la leche

La leche de vaca es un alimento con muchísimo valor nutricional y biológico, consumida ampliamente en la alimentación humana. Su calidad se valora según dos aspectos fundamentales: la calidad composicional, relacionada con el contenido de grasa, proteína, lactosa, y sólidos totales presentes; y la calidad higiénico-sanitaria, incluyendo el recuento de microorganismos y células somáticas, reflejo de la inocuidad alimentaria y la salud animal (Valdivia-Ávila et al., 2021).

Garantizar leche de calidad es un reto enorme para la industria láctea, esto se debe a múltiples factores: el manejo durante el ordeño, la limpieza en la producción y su transporte, enfermedades como la mastitis, las condiciones climáticas y la infraestructura en las granjas (Guevara et al., 2020; López-Carlos et al., 2023).

2.4 Calidad composicional de la leche

La calidad composicional, es determinada principalmente por el porcentaje de grasa, proteínas, lactosa y sólidos totales, ya que estos factores influyen tanto en el rendimiento industrial como en el valor nutritivo de la leche. Esos parámetros son muy variables y cambian según la alimentación del ganado, el estatus general de la hembra, su genética y el manejo en general (Valdivia-Ávila et al., 2021).

El ministerio de agricultura y desarrollo rural emite la resolución 000017 del 2012 donde estipula que debido a las distorsiones que persisten en el mercado lácteo colombiano, derivadas de las características de los sistemas de producción, asimetrías en la comercialización de la leche cruda y la presencia de agentes económicos compradores y/o comercializadores de leche cruda a nivel regional y nacional con características heterogéneas, se hace necesaria la intervención del

gobierno en la fijación del precio al proveedor (ICA , 2012). Es así como mediante el IPC Lácteo quien es un indicador que mide la variación de precios de una canasta de bienes del sector lácteo representativos en el consumo de los hogares del país, se establecen precios y bonificaciones sumadas al costo por litro de leche de acuerdo a cada una de las regiones y se determinan como bonificaciones obligatorias que son los pagos de carácter obligatorio que debe positiva o negativamente económico a su proveedor de leche cruda y que afecta bonificaciones el precio. Para efectos de esta Resolución las higiénica, obligatorias se reconocen y otorgan por concepto de la calidad sanitaria y buenas prácticas ganaderas (BPG) (ICA , 2012).

En la zona del trópico alto de Nariño, Jurado-Gómez et al. (2020), observaron que un recuento de células somáticas (RCS) mayor a 500000 células/mL reduce el contenido de proteína, caseína, y la producción de leche completa, evidenciando así la relación profunda entre la salud de la vaca y la calidad de su leche.

De esta manera, también se establecen las bonificaciones y/o descuentos por conceptos de la calidad y otras disposiciones donde al proveedor de leche le serán reconocidas bonificaciones obligatorias y/o descuentos derivados de los rangos de calidad higiénica y uso de frío establecidos para cada una de las regiones, estos valores se liquidarán en pesos (\$) de acuerdo con las tablas y rangos definidos que se encuentran en el anexo metodológico de la presente Resolución. (ICA , 2012)

Tabla

1.

Límites de Recuento de bacterias por región

REGIÓN	RECUENTO TOTAL DE BACTERIAS (UFC)
Región 1	175.000 - 200.000
Región 2	201.000 - 300.000

Nota tomado de: MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL
RESOLUCIÓN NÚMERO 0007 DE 2012, por el ICA, 2012, p. 7.
<https://www.ica.gov.co/getattachment/0675ddef-933f-4436-95bd-6f757ec88872/2012R17.aspx>

Al proveedor de leche le serán reconocidas bonificaciones obligatorias por calidad sanitaria, para lo cual se exige la presentación del certificado expedido por el ICA como hatos libre de brucelosis y/o tuberculosis o de ambas enfermedades, la bonificación por hatos de una enfermedad corresponde a \$10 por litro y por las dos enfermedades a \$20 por litro. A partir del primero de marzo de 2012, se establece una bonificación de \$10 por litro de leche para hatos que presenten al agente comprador el certificado de Buenas Prácticas Ganaderas – BPG, expedido por el ICA. (ICA , 2012).

2.5 Calidad higiénico-sanitaria de la leche

Los principales parámetros empleados para valorar la calidad higiénica son el recuento de bacterias aerobias mesófilas (BAM) y el recuento de células somáticas (RCS o SCC). El BAM revela como se encuentran las condiciones higiénicas durante el ordeño, el almacenamiento y el

transporte y el CCS está primordialmente relacionado con la salud de la ubre y la posibilidad de mastitis (Patiño-Burbano et al. 2023).

Estudios realizados en Colombia y Venezuela han revelado que la rutina de ordeño, como el secado de los pezones, la desinfección de las herramientas y el almacenamiento de herramientas influyen sobre la carga microbiana de la leche (Guevara et al. 2020). Incluso, la mastitis subclínica, en ocasiones genera que el recuento de células somáticas sobrepase los niveles recomendados, lo cual, tiene un efecto negativo en el contenido de proteína y la estabilidad tecnológica de la leche (Jurado-Gómez et al. 2020).

2.6 Entorno y estación

El ambiente desempeña un papel fundamental en la producción lechera; factores como el clima, la humedad y las lluvias impactan en la incidencia de mastitis, alteran el crecimiento microbiano y cambian la composición láctea. Patiño-Burbano et al. (2023), observaron en el departamento de Nariño que las células somáticas incrementaban con las lluvias fuertes, aun así, la mayoría mantenían una buena calidad higiénica.

De manera similar, investigaciones mexicanas señalan que el índice temperatura-humedad (THI) perjudica los sólidos totales, proteína, y grasa, presentes en la leche y además eleva las bacterias y células cuando se presentan temperaturas elevadas (López-Carlos et al., 2023).

2.7 Parámetros metabólicos.

La leche de vaca es un alimento fundamental cuya producción ha experimentado un avance notable en las últimas décadas debido al incremento en el consumo de lácteos y cambios en la alimentación de la población (Sánchez et al., 2020) (Mariana Cardona Betancur, 2024). Este aumento en la producción ha facilitado el acceso generalizado a

productos lácteos, contribuyendo significativamente a la mejora del nivel de salud de la población. En términos de composición, la leche de vaca contiene entre un 3 y 4 % de proteínas, siendo las más abundantes las caseínas (75 %), globulinas (11 %) y albúminas (5 %). La fracción lipídica (3-6 %) está compuesta mayoritariamente por lípidos apolares (>98 %) y una pequeña fracción de lípidos polares

La cetosis es un desorden metabólico en el cual aumentan los niveles circulantes de cuerpos cetónicos (acetona, acetoacetato y β HB) como consecuencia del incremento de AGNE (Ácidos Grasos No esterificados) circulantes o de los requerimientos energéticos, estos últimos a su vez pueden superar la capacidad de ingesta de carbohidratos durante el posparto temprano y resultar en una falla de los mecanismos de adaptación al balance energético negativo (BEN), lo que conduce a hipercetonemia y la presentación de cetosis clínica y subclínica (Oscar Huertas Molina, 2020)

3. Metodología

3.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la empresa Agropecuaria Aliar finca La Fazenda, ubicada en el municipio de Puerto Gaitán, Meta, en los Llanos Orientales de Colombia, a una altitud aproximada de 100 a 150 m. s. n. m, con temperaturas que oscilan entre 29 y 35°C. El sistema de producción lechera cuenta con 1200 animales en total el cual se emplea un sistema de ordeño mecánico.

3.2 Muestreo y caracterización

Se llevó a cabo un estudio longitudinal de doce (12) meses en la Agropecuaria Aliar – La Fazenda, recolectando muestras de leche representativas de cada época del año

desde el mes de enero del 2025 a Febrero del 2026; es de suma importancia resaltar que el cumplimiento del 100% de los meses por muestreo dependen directamente de la viabilidad de las muestras pese a que el traslado de la zona de muestreo al lugar de análisis resulta complicar la conservación de las mismas teniendo en cuenta que el volumen dentro del transporte es complejo al igual que la prioridad que las agencias transportadoras le den a las mismas; con un total de 1200 muestras mensuales para su respectivo análisis y réplicas que permiten llevar a cabo el estudio de los distintos parámetros higiénicos, composicionales y metabólicos que se encuentran inmersos el producto final; dentro de la cantidad de muestras resulta importante mencionar y tomar en cuenta la pérdida total que se puede tener en cuanto a su desplazamiento entre departamentos (Meta-Antioquia) para ejecutar su respectivo análisis. De igual manera dentro del estudio se tiene en cuenta la estimación de pérdida del 40 al 45% de muestras individuales listas para ser analizadas las cuales por factores relacionados directamente al su transporte y conservación pierden las características principales que permitan el análisis total de los animales inicialmente muestreados, obteniendo así una cantidad final de 800 muestras por envío en condiciones disponibles para análisis y un total de 9659 datos para el desarrollo investigativo a desarrollar en los periodos de estacionalidad mencionados.

Para cada muestra, se tuvieron en cuenta metadatos como el ID del animal, fecha y DEL; RCS, producción total día por animal y producción total al mes, número de partos y precipitación.

No se tendrá en cuenta la alimentación a causa de la variabilidad constante en sus dietas nutricionales de manejo indefinido que pueden diferir y distorsionar los resultados del muestreo total. Se determinará la composición (grasa, proteína, lactosa, sólidos) e higiene (total de

bacterias, recuento de células somáticas RCS) de las muestras y parámetros metabólicos como el MUN y el Beta-hidroxibutirato BHB. Los datos se clasificaron por épocas para poder ejecutar la comparación de tendencias y medir la variación temporal de cada parámetro usando estadísticas descriptivas y pruebas de comparación entre estas, teniendo en cuenta principalmente los datos recolectados por muestreo lechero y excluyendo así los meses sin resultado con el fin de obtener un análisis final sin afectar el objetivo principal.

3.3 Análisis de relaciones y correlaciones

Se realizó un análisis con la base de datos consolidada y mediante el uso del sistema estadístico INFOSTAT, el cual, a diferencia de otros programas generalistas brinda herramientas y terminología de análisis optimizados para manejar la variabilidad inherente de sistemas biológicos como lo son la producción lechera donde se explorarán las relaciones bivariadas y parciales entre parámetros composicionales e higiénicos usando correlaciones con significancia ($p < 0,05$) según corresponda (Pearson o Spearman según distribución) acompañada de matrices de correlación visualizadas con heatmaps. Se controlaron posibles confundidores relevantes (p. ej. días en leche, producción, manejo, número de partos, promedio de litros por animal) mediante correlaciones parciales y análisis estratificados, teniendo en cuenta los factores ya mencionados que generan más seguridad en los resultados si se decide manejar un solo dato por hato o en su defecto no tenerlo presente. Esta fase permitirá identificar patrones consistentes (como lo son la asociación entre SCC y contenido proteico o entre recuentos bacterianos y tiempo hasta análisis de muestras) que serán la base para el modelado predictivo.

$$\text{Correlación Pearson } r = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{[\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2]}}$$

3.4 Modelado predictivo y validación

Se construyeron modelos de regresión multivariada (y, solo cuando fue necesario, modelos lineales mixtos para datos repetidos) donde las variables higiénicas (SCC y Aporte de RCS) serán las respuestas y las variables composicionales, ambientales y de manejo actuarán como predictores. Se aplicará selección de variables guiada por criterios estadísticos (AIC/BIC) y criterio biológico, se evaluaron supuestos del modelo (residuos, homocedasticidad, colinealidad) y se validará el ajuste mediante partición de datos o validación cruzada. Los modelos finales se interpretarán en términos de efectos marginales y utilidad práctica para identificar factores composicionales que expliquen la variación higiénica y para proponer medidas de manejo estacional orientadas a mejorar la calidad de la leche.

Modelo de regresión lineal múltiple: $Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \beta$

4. Resultados

En este estudio se analizaron los registros productivos y de calidad composicional e higiénica de la leche bovina generados entre enero del 2025 y febrero del 2026 en Agropecuaria Aliar- La Fazenda. El estudio incluyó 1976 hembras de la raza girolando entre primero y octavo parto, a las cuales se les evaluó mensualmente la producción, los días en leche (DEL), el recuento de células somáticas y los porcentajes de grasa, proteína, sólidos totales (ST), lactosa, además de las concentraciones de MUN (mg/dl) y BHB en leche para un total de 9659 registros, en la tabla 1 se observan los valores obtenidos para cada variable. Es importante señalar que en los meses de julio, agosto, septiembre y noviembre no se obtuvieron reportes debido a limitaciones logísticas dentro del sistema operativo y a partir de esta información se

presentan los resultados del análisis de estacionalidad, las asociaciones entre variables y los modelos de regresión desarrollados

Tabla 2.

Medidas resumen

<i>Variable</i>	<i>n</i>	<i>Media</i>	<i>E.E</i>	<i>Mín</i>	<i>Máx</i>
<i>Score lineal</i>	8484	4,73	0,02	0,64	9,64
<i>Grasa (%)</i>	8484	3,68	0,01	1,93	9,06
<i>Proteína (%)</i>	8484	3,4	$4,40 \times 10^{-03}$	2,45	6,37
<i>ST (%)</i>	8484	12,36	0,01	9,37	20,8
<i>Lactosa (%)</i>	8484	4,65	$4,10 \times 10^{-03}$	1,5	5,75
<i>MUN (mg/dl)</i>	8484	11,93	0,05	4,7	46,7
<i>BHB (Mm)</i>	8484	0,07	$1,30 \times 10^{-03}$	0	2,3
<i>Relación G/P</i>	8484	1,08	$3,30 \times 10^{-03}$	0,3	3,38
<i>Pdción</i>	8484	15,76	$7,00 \times 10^{-02}$	2,02	39,2

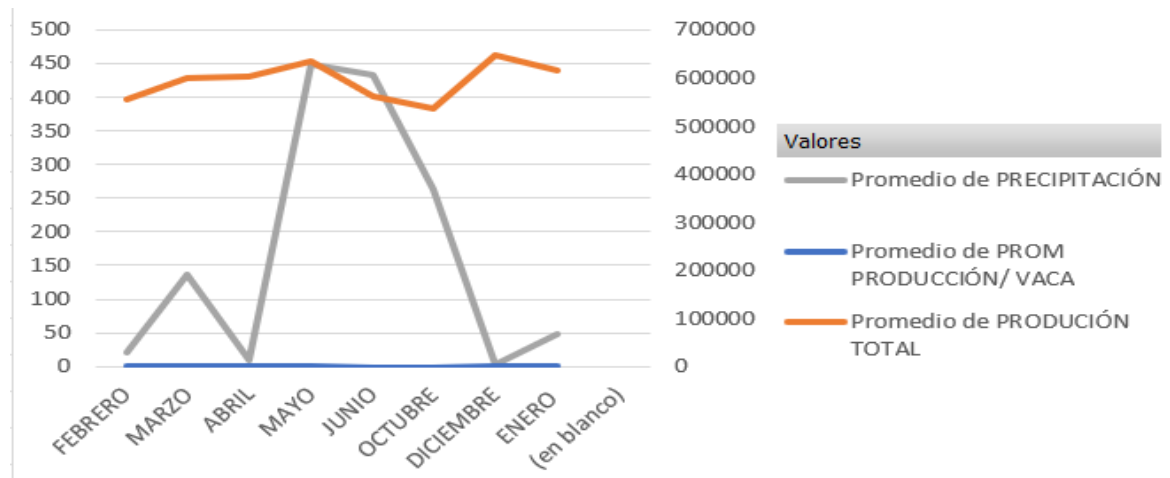
4.1 Estacionalidad

Para explorar la estacionalidad de los parámetros productivos y de la calidad de la leche, se evaluó la variación mensual de cada variable a lo largo del año 2025-2026 identificando

patrones recurrentes asociados a cambios climáticos, de manejo, variabilidad en suplementación, estado fisiológico del hato y disponibilidad de biomasa aprovechada por los animales.

Figura 1.

Precipitación y volumen de producción en meses de estudio



Luego de realizar el análisis del volumen total de producción en un sistema de lechería especializada como se hace en Agropecuaria Aliar con 1200 animales en ordeño, se conserva que la época de lluvias ejerce una influencia bimodal en los rendimientos diarios; Es así como en un extremo se evidencia mayor oferta forrajera y con el confort térmico derivado de la nubosidad y la reducción en la radiación solar directa suelen potenciar el pico de producción; sin embargo, en escalas productivas de esta magnitud, el exceso de precipitación puede generar un efecto contraproducente debido al estrés por humedad que se puede presentar tanto en el suelo como en los animales, y al deterioro de la integridad física de las pasturas por pisoteo (sobrepastoreo hídrico), lo que limita la capacidad de pastoreo efectivo al limitarse los desplazamientos de los animales en búsqueda de alimento o agua por la profundidad y terreno inestable que se presenta.

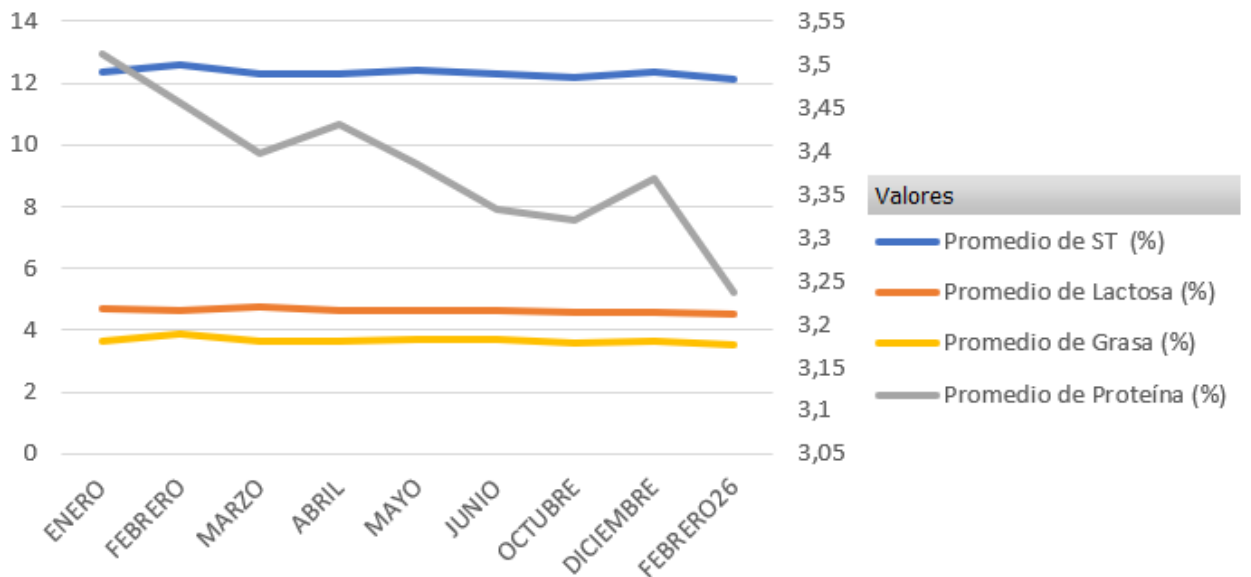
Estos parámetros de estudio terminan siendo negativos para la producción ya que se

limita el confort brindado a los animales productivos que resultan viéndose reflejados en menos litros de leche debido al gasto energético por desplazamiento.

En cuanto a la línea de color azul que expresa promedio de producción / vaca no son valores expresados en 0, sino valores extremadamente bajos y fuera de los alcances planteados por los dos ejes ya explicados

Figura 2.

Calidad composicional



La figura 2 sustenta la calidad composicional encontrada tras realizar los análisis en los meses de estudio, dentro de los resultados encontrados tras el análisis en relación con la calidad composicional, se evidencia variabilidad en el MUN, la cual suele ser de los factores con mayor cambio tomándose esto como un valor influyente en el porcentaje de proteína el cual a pesar del movimiento exagerado y cambios bruscos no genera mayor diferencia en el porcentaje como se explica naturalmente en la literatura. La explicación ambiental a esta respuesta puede

hacer referencia a los estados de épocas de transición, invierno y verano; Transición se conoce como cada uno de los inicios de los estados de invierno y verano, donde se encuentra un cambio físico ambiental (CC-T°-Humedad) donde las influencias de humedad, precipitaciones, cambios de temperatura y número de animales en pastoreo da respuesta al factor composicional en este caso del forraje donde se encuentran factores influyentes como lo son la Proteína, Fibra y % de materia seca como aporte principal del consumo de alimento de los animales y a esto se suma el aporte adicional que se suministra mediante las dietas de alimentación usadas post- ordeño.

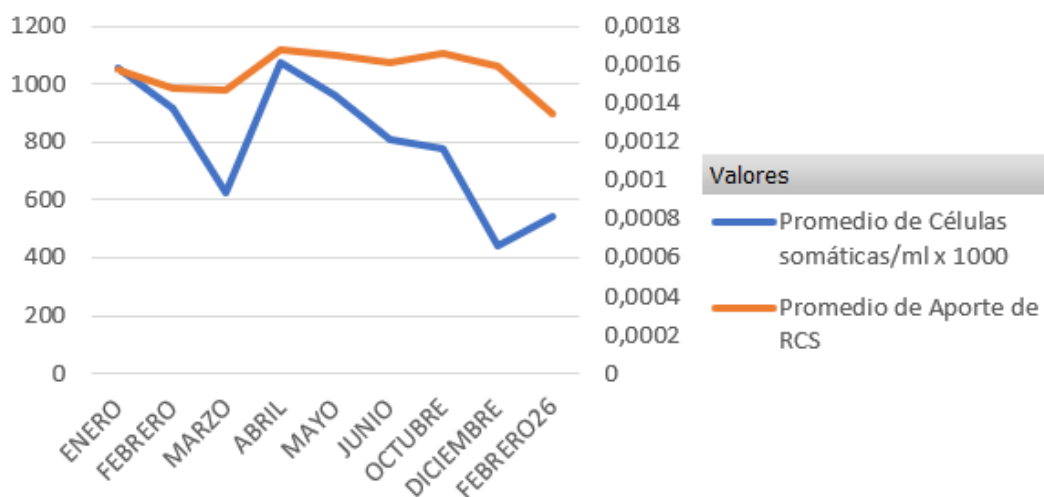
Cuando suele encontrarse “controlado” el factor ambiente como se muestra en el mes de diciembre en la gráfica, es notoria la baja de factores proteína, lactosa y grasa ya que al ser una época de verano con altas temperaturas, los forrajes suelen perder la mayoría de sus aportes nutricionales dadas las condiciones medioambientales a las cuales se tienen que adaptar;

Directamente esto nuevamente se enlaza al cambio de la suplementación donde busca suplir requerimientos nutricionales que no suelen encontrar en su alimento principal, los forrajes.

Figura

3.

Calidad higiénica



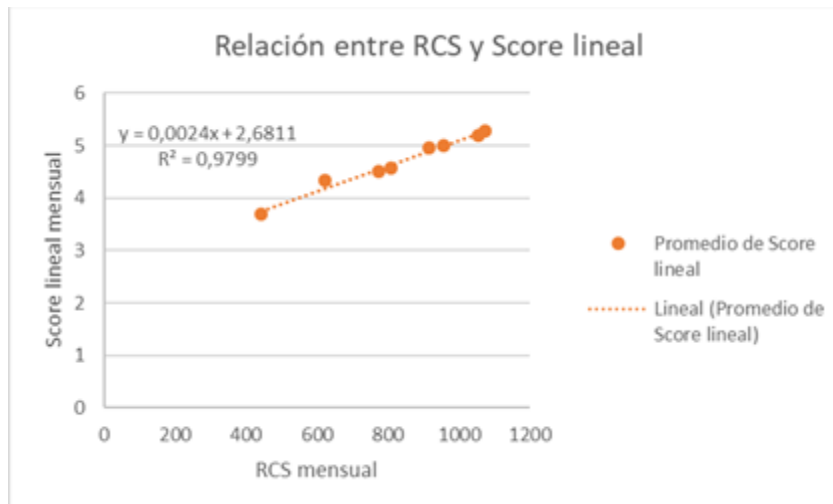
En la figura 3 se observan los resultados obtenidos tras el análisis de la calidad higiénica donde se evidencia un pico inflamatorio dado el incremento drástico en la línea azul correspondiente de (RSC) en abril aproximadamente donde llega casi a superar las 1000cél/ml; Técnicamente esto indica una alta prevalencia de mastitis subclínica presente dentro del hato. Este factor tiene una explicación clara por el barro que se presenta en las zonas de pastoreo y dormideros, los cuales actúan como reservorio de patógenos ambientales, la humedad ablanda el esfínter del pezón y facilita así la entrada de bacterias tras el ordeño.

Por otro lado, la línea naranja que representa el promedio de aporte se mantiene en niveles máximos durante este periodo, siendo no solo los animales afectados por este proceso, sino que hay un aporte constante y generalizado de células inflamatorias al tanque, propio de un ambiente sanitario por las lluvias.

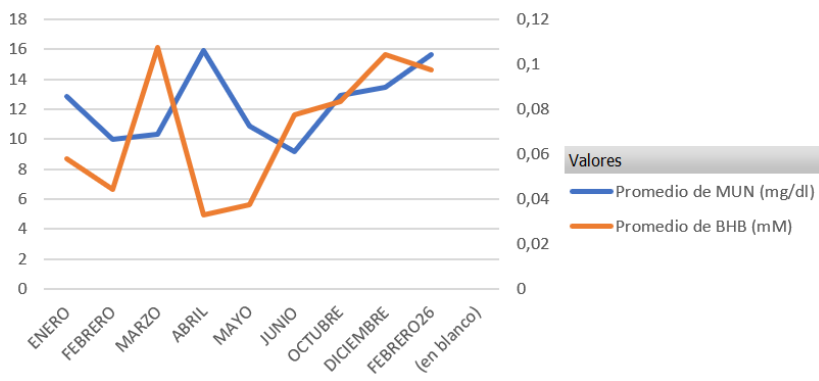
A partir de octubre y hasta febrero aproximadamente, se observa una tendencia a la baja significativa, validando la observación objetivo del estudio donde se ve un favorecimiento significativo por factores del clima.

En diciembre y febrero la línea azul cae por debajo de las 600 células/ml. La reducción de exposición a ambientes encharcados disminuye la carga bacteriana en la piel del pezón y mejora la higiene de la ubre antes del ordeño. En época seca, el sellado del pezón resulta ser más eficiente y el estrés térmico por humedad disminuye, lo que favorece el sistema inmune de la vaca.

El recuento de células somáticas es un indicador de la respuesta inmune ante una agresión en la glándula mamaria. En lechería especializada, un RCS superior a 200.000 células/ml indica la presencia de un proceso infeccioso activo.

Figura 4.*Relación RCS y Score Lineal*

De igual manera se encuentra la disminución significativa de estos factores en el periodo comprendido como transición a verano, que se da entre los meses de octubre a febrero donde las condiciones medioambientales y de manejo dan un giro total que permiten mejorar la calidad de la leche como producto final y por esto mismo se añaden factores positivos como lo son condición corporal, promedio litros de leche/vaca, cantidad total de leche/día y por encima de lo ya mencionado, la exposición de ubres a bacterias malignas se elimina hasta en un 65% en comparación con lo que se pueden encontrar en periodo de lluvias o mejor llamado invierno.

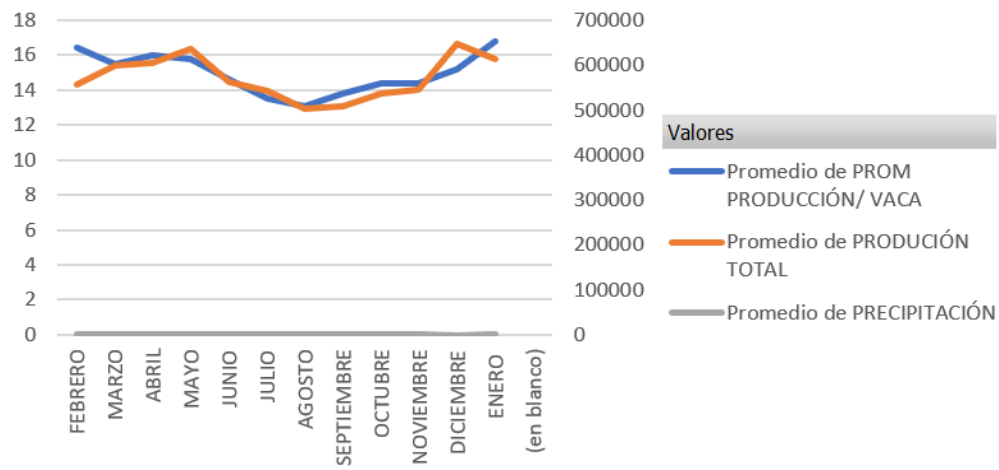
Figura 5.*Parámetros metabólicos de la hembra evaluados en la leche*

La figura 5 muestra los parámetros metabólicos en la leche, una vez analizados los resultados composicionales se encuentra adjunta la composición metabólica con datos muy dicentes correspondientes al MUN y beta- hidroxibutirato el cual es aprovechado por los animales como energía y alternativa suficiente para ser utilizados por su necesidad en relación a la producción de acuerdo a sus objetivos individuales y por lotes productivos; este factor favorece; se usa como marcador de balance energético negativo que en altos valores puede inferir en fertilidad y producción ocasionando pérdidas gravemente altas.

La variabilidad y movimiento expresado mediante el gráfico que puede presentar a través del tiempo suele generar respuestas a la implementación y cambios drásticos de dietas usadas en las épocas del año mencionadas dada la necesidad de los animales y con el fin de intentar mantener persistencias dentro de las curvas de lactancia por factores medioambientales que dirigen directamente a los resultados obtenidos productivamente. Los factores MUN y BHB arrojan datos completamente adversos y alejados dentro de su estudio realizado anualmente

Figura

Gráfico de producción y promedio

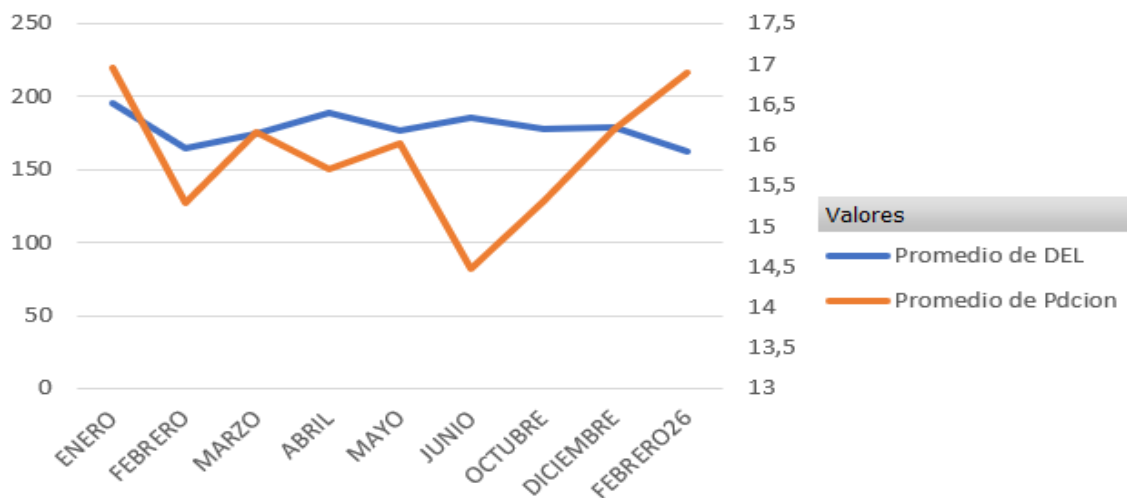


Resulta ser evidente que el promedio de producción / vaca y la producción total tienen un comportamiento similar casi igual ya que son directamente dependientes;

En cuanto al promedio de precipitación el valor que se evidencia no responde directamente a valores en 0, sino que su valor no alcanza los planteados en los ejes principal y secundario ya planteados.

Figura 7.

DEL y producción / vaca



El gráfico 7 cuenta con la expresión correspondiente a producción y DEL de los animales estudiados durante el periodo de análisis, de acuerdo con el tema central correspondiente a época de lluvias y época seca se encuentra un punto de quiebre aproximadamente en el mes de junio donde se observa una caída drástica llegando a su punto más bajo con un promedio de producción de 14,5L/vaca. Esta caída coincide plenamente con el pico de la época de lluvias que genera estrés ambiental y afecta directamente el consumo de forraje sumado el excesivo gasto de los animales para producir litros de leche.

Los días en leche se mantienen relativamente oscilando entre 160 y 200 días. Un DEL en promedio de 170 a 180 días es aceptable para una lechería especializada, indicando que la producción se distribuye en los distintos lotes de producción.

Resulta ser evidente como es que en abril los DEL aumentan ligeramente mientras la producción empieza a bajar, se puede entender como estrés hídrico y baja producción por días en leche elevados; esto indica que el hato se está alejando del pico de lactancia justo cuando el clima se vuelve más agresivo, estos factores son clave para la caída productiva de junio.

A partir de octubre, se evidencia una recuperación sostenida alcanzando el promedio de 17L/vaca que se correlaciona directamente inversamente con el gráfico 4 el cual a medida que el RCS baja, la producción sube. Una ubre con menos inflamación resulta ser más eficiente convirtiendo y aprovechando nutrientes en leche.

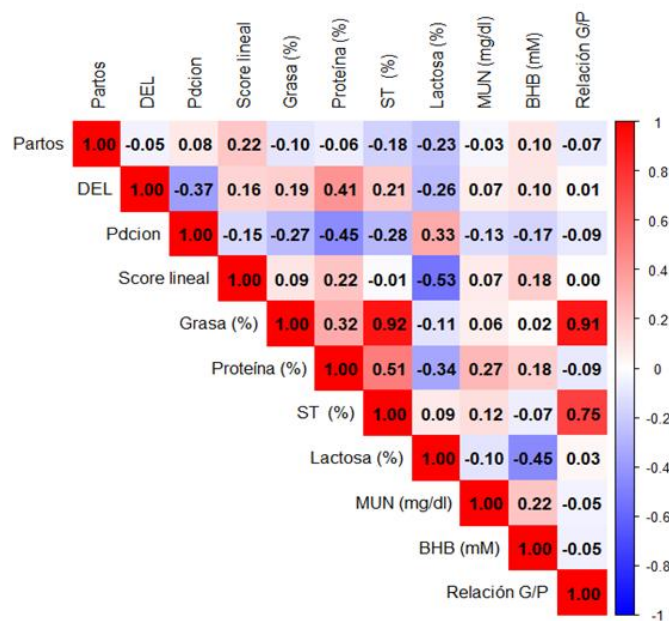
4.2 Análisis de correlación

Con el fin de evaluar las relaciones entre los parámetros productivos, composicionales y metabólicos del hato, se realizó un análisis de correlación utilizando las variables: producción de leche, días en leche (DEL), número de partos, porcentaje de grasa, porcentaje de proteína, porcentaje de lactosa, porcentaje de sólidos totales (ST), relación grasa/proteína, MUN (mg/dl),

BHB (Mm) y el score lineal como indicador de salud mamaria. En este estudio, el recuento de células somáticas (RCS) fue transformado a score lineal con el fin de aproximar la distribución a la normalidad, dado que el RCS presentó una amplia variabilidad individual. Las correlaciones se calcularon mediante el coeficiente de Pearson, lo que permitió identificar patrones fisiológicos y sanitarios relevantes dentro del sistema productivo evaluado.

Figura 8.

Matriz de correlación entre parámetros productivos composicionales, metabólicos e higiénicos en vacas Girolando durante 2025



En la Figura 8 se observan las correlaciones analizadas. Las correlaciones encontradas reflejan patrones fisiológicos esperados respecto hembras lactantes y su metabolismo energético.

La relación negativa entre días en leche (DEL) y producción (-0,37) evidencia el descenso natural de la producción a medida que avanza la lactancia, asociado a la reducción de la

capacidad secretora del epitelio mamario. De forma paralela, el incremento de la proteína con el avance de los DEL (0,41) coincide con el efecto de concentración característico de lactancias avanzadas y con la mejora gradual del balance energético post-pico, lo que también explica la correlación negativa entre producción y proteína (-0,45). La correlación positiva entre producción y lactosa (0,33) respalda la función osmótica de este carbohidrato, que determina el volumen de leche sintetizado. La lactosa mostró una relación negativa con el score lineal (-0,53), acorde con el comportamiento de este indicador frente a procesos inflamatorios: la mastitis altera la permeabilidad epitelial y reduce la síntesis de lactosa, lo que se traduce en menores concentraciones en leche.

Las correlaciones observadas entre los componentes sólidos fueron igualmente consistentes con su dinámica fisiológica; la grasa presentó asociaciones positivas con proteína (0,32), sólidos totales (0,92) y relación grasa/proteína (0,91), reflejando su papel como el componente más variable de los sólidos y su tendencia a aumentar cuando la producción disminuye o cuando el animal transita hacia un balance energético más favorable. En esta misma línea, la correlación proteína con sólidos totales (0,51), dado su aporte directo a la fracción sólida.

Las correlaciones negativas entre proteína y lactosa (-0,34) y negativa entre lactosa y BHB (-0,45) son coherentes con la fisiología metabólica: mayores concentraciones de BHB indican mayor movilización lipídica y menor disponibilidad de glucosa para la síntesis de lactosa, lo que reduce su concentración mientras aumenta de forma relativa la proteína.

Finalmente, la asociación positiva entre MUN y BHB (0,22) sugiere que animales con mayor movilización pueden exhibir una eficiencia variable en el uso del nitrógeno, mientras que la correlación MUN–proteína (0,27) se alinea con lo esperado en sistemas donde variaciones en

la oferta o degradabilidad de la proteína dietaria impactan tanto el nitrógeno ureico como la composición proteica de la leche.

5. Análisis de regresión

Los análisis de regresión múltiple se realizaron con el propósito de evaluar la magnitud y dirección de los efectos que variables metabólicas y productivas ejercen sobre la composición de la leche en bovinos Girolando.

Se plantearon dos modelos de regresión donde se evaluó el efecto de BHB y de MUN en la producción de leche.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_1 X_4 + \beta_6 X_3 X_4 + \varepsilon_{ij}$$

Modelo para evaluación efecto de BHB:

$$\begin{aligned} \text{Producción} = & \beta_0 + \beta_1(\text{DEL}) + \beta_2(\text{DEL}^2) + \beta_3(\text{Partos}) + \beta_4(\text{BHB}) + \beta_5(\text{BHB})(\text{DEL}) \\ & + \beta_6(\text{BHB})(\text{Partos}) + \varepsilon_{ij} \end{aligned}$$

β_0 = Intercepto

β_1 = El valor esperado de la producción por cada aumento en los DEL manteniendo constante el número de parto y BHB

β_2 = Cambio esperado en la producción con el aumento de la curva de lactancia

β_3 = Cambio esperado en la producción para cada parto comparado con hembras de primer parto y manteniendo constante DEL y BHB

β_4 = Cambio esperado en la producción por cada aumento de BHB ajustado por DEL y número de partos

β_5 = Cambio esperado en la producción por cada aumento de BHB según el número de partos

β_6 = Cambio esperado en la producción por cada aumento de BHB según los DEL.

En la tabla 2 se observa que el modelo ajustado para evaluar los factores asociados a la producción de leche mostró que tanto el avance de la lactancia como el estado metabólico (medido por BHB) y el número de partos explicaron de manera significativa la variación observada en el rendimiento diario. En primer lugar, los días en leche (DEL) presentaron un efecto negativo altamente significativo, indicando una disminución progresiva de la producción a medida que transcurre la lactancia. Además, el término cuadrático de DEL también fue significativo, lo cual confirma una curvatura descendente típica de la curva de producción, donde la tasa de disminución se acentúa conforme avanza la lactancia.

Tabla 3.

Parámetros estimados del modelo de regresión, significancia estadística de los predictores para BHB

	<i>Estimadores</i>	<i>Error estándar</i>	<i>Valor t</i>	<i>Pr(> t)</i>	<i>Significancia</i>
<i>Intercepto</i>	1,86E+04	2,44E+02	75.991	< 2e-16	***
<i>DEL</i>	-1,89E+01	1,68E+00	-11.219	< 2e-16	***
<i>I(DEL^2)</i>	-8,53E-03	3,68E-03	-2.320	0.020372	*
<i>Partos2</i>	8,45E+02	2,46E+02	3.429	0.000609	***
<i>Partos3</i>	1,98E+03	2,63E+02	7.522	5.97e-14	***
<i>Partos4</i>	3,19E+03	2,91E+02	10.959	< 2e-16	***

	<i>Estimadores</i>	<i>Error</i>	<i>Valor t</i>	<i>Pr(> t)</i>	<i>Significancia</i>
	<i>estándar</i>				
<i>Partos5</i>	2,85E+03	3,01E+02	9.474	< 2e-16	***
<i>Partos6</i>	1,77E+03	2,99E+02	5.927	3.21e-09	***
<i>Partos7</i>	1,21E+03	3,43E+02	3.519	0.000435	***
<i>Partos8</i>	6,75E+02	6,52E+02	1.035	0.300587	
<i>Partos9</i>	-4,95E+03	3,73E+03	-1.326	0.184881	
<i>BHB</i>	-7,29E+03	2,26E+03	-3.229	0.001246	**
<i>DEL:BHB</i>	6,77E+00	4,97E+00	1.363	0.172786	
<i>Partos2:BHB</i>	-2,31E+03	2,45E+03	-0.941	0.346818	
<i>Partos3:BHB</i>	-2,35E+03	2,38E+03	-0.989	0.322718	
<i>Partos4:BHB</i>	-3,77E+03	2,52E+03	-1.499	0.133956	
<i>Partos5:BHB</i>	-1,08E+03	2,58E+03	-0.417	0.676591	
<i>Partos6:BHB</i>	-1,36E+03	2,43E+03	-0.562	0.574287	
<i>Partos7:BHB</i>	-2,30E+03	2,72E+03	-0.848	0.396534	
<i>Partos8:BHB</i>	-2,20E+03	5,50E+03	-0.400	0.689518	
<i>Partos9:BHB</i>	3,20E+04	4,87E+04	0.657	0.511003	

Respecto al número de partos, las vacas multíparas produjeron significativamente más leche que las primíparas, con incrementos particularmente notorios entre el segundo y quinto parto, lo cual coincide con patrones esperados de madurez fisiológica. Por otro lado, el β -hidroxibutirato (BHB) mostró un efecto negativo significativo sobre la producción: valores elevados de este metabolito se asociaron con reducciones importantes en el rendimiento diario, lo

cual es consistente con el impacto fisiológico de la cetosis sobre el balance energético y la capacidad productiva.

Las interacciones entre BHB con DEL y con el número de partos no resultaron significativas, lo que sugiere que el efecto negativo del BHB es relativamente constante a lo largo de la lactancia y no depende del número de parto. Estos resultados permiten concluir que la producción está fuertemente influenciada por la etapa de lactancia y por el estado metabólico de la vaca, mientras que las diferencias entre partos siguen patrones fisiológicos ampliamente reportados. Adicionalmente, estos efectos se encuentran en parte modulados por la disponibilidad de alimento a lo largo del año, ya que la oferta y calidad del forraje condicionan el balance energético de las vacas y, por tanto, su capacidad productiva y la expresión de indicadores metabólicos como el BHB y el MUN.

Modelo para evaluación efecto de MUN:

$$\begin{aligned} \text{Producción} = & \beta_0 + \beta_1(\text{DEL}) + \beta_2(\text{DEL}^2) + \beta_3(\text{Partos}) + \beta_4(\text{MUN}) + \beta_5(\text{MUN})(\text{DEL}) \\ & + \beta_6(\text{MUN})(\text{Partos}) + \varepsilon_{ij} \end{aligned}$$

β_0 = Intercepto

β_1 = El valor esperado de la producción por cada aumento en los DEL manteniendo constante el número de parto y MUN

β_2 = Cambio esperado en la producción con el aumento de la curva de lactancia

β_3 = Cambio esperado en la producción para cada parto comparado con hembras de primer parto y manteniendo constante DEL y MUN

β_4 = Cambio esperado en la producción por cada aumento de MUN ajustado por DEL y número de partos

β_5 = Cambio esperado en la producción por cada aumento de MUN según el número de partos

β_6 = Cambio esperado en la producción por cada aumento de MUN según los DEL

Tabla 4:

Parámetros estimados del modelo de regresión, significancia estadística de los predictores del MUN

	<i>Estimadores</i>	<i>Error estándar</i>	<i>Valor t</i>	<i>Pr(> t)</i>	<i>Significancia</i>
<i>(Intercept)</i>	<i>1,75E+04</i>	<i>5,97E+02</i>	<i>29.369</i>	<i><0,02</i>	<i>***</i>
<i>DEL</i>	<i>-9,62E+00</i>	<i>2,29E+00</i>	<i>-4.196</i>	<i>2.75e-05</i>	<i>***</i>
<i>I(DEL^2)</i>	<i>-6,83E-03</i>	<i>3,69E-03</i>	<i>-1.853</i>	<i>0.063942</i>	<i>.</i>
<i>Partos2</i>	<i>2,24E+03</i>	<i>6,40E+02</i>	<i>3.505</i>	<i>0.000458</i>	<i>***</i>
<i>Partos3</i>	<i>2,22E+03</i>	<i>6,87E+02</i>	<i>3.227</i>	<i>0.001257</i>	<i>**</i>
<i>Partos4</i>	<i>3,62E+03</i>	<i>7,49E+02</i>	<i>4.835</i>	<i>1.35e-06</i>	<i>***</i>
<i>Partos5</i>	<i>3,41E+03</i>	<i>7,71E+02</i>	<i>4.426</i>	<i>9.73e-06</i>	<i>***</i>
<i>Partos6</i>	<i>2,47E+03</i>	<i>7,67E+02</i>	<i>3.213</i>	<i>0.001317</i>	<i>**</i>
<i>Partos7</i>	<i>1,10E+03</i>	<i>8,72E+02</i>	<i>1.264</i>	<i>0.206364</i>	
<i>Partos8</i>	<i>-2,93E+02</i>	<i>1,38E+03</i>	<i>-0.213</i>	<i>0.831097</i>	
<i>Partos9</i>	<i>3,90E+03</i>	<i>1,45E+04</i>	<i>0.269</i>	<i>0.787774</i>	
<i>MUN</i>	<i>6,67E+01</i>	<i>4,52E+01</i>	<i>1.477</i>	<i>0.139842</i>	

<i>DEL:MUN</i>	<i>-8,13E-01</i>	<i>1,33E-01</i>	<i>-6.104</i>	<i>1.08e-09</i>	<i>***</i>
<i>Partos2:MUN</i>	<i>-1,33E+02</i>	<i>4,92E+01</i>	<i>-2.701</i>	<i>0.006934</i>	<i>**</i>
<i>Partos3:MUN</i>	<i>-4,81E+01</i>	<i>5,34E+01</i>	<i>-0.901</i>	<i>0.367621</i>	
<i>Partos4:MUN</i>	<i>-8,02E+01</i>	<i>5,92E+01</i>	<i>-1.353</i>	<i>0.175960</i>	
<i>Partos5:MUN</i>	<i>-7,13E+01</i>	<i>6,07E+01</i>	<i>-1.174</i>	<i>0.240486</i>	
<i>Partos6:MUN</i>	<i>-8,83E+01</i>	<i>5,95E+01</i>	<i>-1.484</i>	<i>0.137811</i>	
<i>Partos7:MUN</i>	<i>-2,56E+01</i>	<i>6,78E+01</i>	<i>-0.377</i>	<i>0.706222</i>	
<i>Partos8:MUN</i>	<i>4,37E+01</i>	<i>1,08E+02</i>	<i>0.405</i>	<i>0.685558</i>	
<i>Partos9:MUN</i>	<i>-7,21E+02</i>	<i>1,43E+03</i>	<i>-0.506</i>	<i>0.612971</i>	

El modelo de regresión que incluyó el MUN como predictor se observa en la tabla. Este modelo permitió identificar cómo este indicador del metabolismo proteico se relaciona con la producción de leche bajo diferentes condiciones productivas. En primer lugar, los días en leche (DEL) presentaron un efecto negativo significativo sobre la producción, reflejando la disminución progresiva del rendimiento conforme avanza la lactancia. El término cuadrático de DEL mostró una tendencia hacia la significancia, lo que sugiere una curvatura en la trayectoria productiva, aunque menos marcada que en el modelo basado en BHB, lo cual es coherente con el hecho de que el MUN no es un indicador directo del balance energético.

El número de partos mostró diferencias consistentes con la fisiología productiva: las vacas entre el segundo y el sexto parto presentaron producciones superiores frente a las primíparas, mientras que las categorías extremas (≥ 7 partos) exhibieron estimaciones más variables, posiblemente relacionadas con un bajo número de observaciones. En contraste, el MUN como efecto principal no fue significativo, indicando que su variación aislada no explica

de manera directa la producción de leche, lo cual coincide con su naturaleza como indicador de eficiencia ruminal y no como determinante primario del rendimiento.

Sin embargo, la interacción entre MUN y DEL fue altamente significativa, evidenciando que el efecto del MUN sobre la producción depende de la etapa de lactancia. En particular, valores elevados de MUN se asociaron con una disminución más pronunciada de la producción en fases avanzadas, lo que sugiere un desajuste entre el aporte proteico y la disponibilidad energética, afectando la eficiencia de síntesis de proteína microbiana y, por ende, la capacidad productiva. Asimismo, la interacción significativa entre MUN y el segundo parto indica que las vacas de esta categoría son más sensibles a variaciones en el MUN, posiblemente debido a su demanda nutricional adicional asociada a la continuación del crecimiento corporal.

En conjunto, estos resultados evidencian que, aunque el MUN no es un predictor directo del nivel productivo, sí actúa como un modulador importante, especialmente en función de la etapa de lactancia y del estado fisiológico de la vaca. Ello resalta la importancia de una adecuada sincronía entre energía y proteína en la dieta a lo largo del año, considerando que la disponibilidad y calidad de los forrajes pueden amplificar estos efectos metabólicos.

6. Discusión

Los resultados corroboran que la dinámica productiva y la calidad composicional de la leche se encuentran estrechamente ligados al estado fisiológico y metabólico de las hembras lactantes analizadas en este estudio. La correlación negativa observada entre los días en leche (DEL) y la producción, junto con el comportamiento de esta misma variable, confirma la curva de lactancia típica de la especie, donde la regresión del epitelio mamario dicta un descenso progresivo en el volumen tras alcanzar el pico de producción.

El escenario de menor volumen se traduce en un efecto de concentración de sólidos, lo cual explica la asociación positiva entre los DEL y el porcentaje de proteína, como la estrecha relación entre la grasa y los sólidos totales.

Por otro lado, el comportamiento de aumento y descenso de volumen de leche también se asocia directamente a la mayor disponibilidad de forraje a disposición y consumo para los animales productivos ya que facilitan el consumo voluntario; este consumo voluntario se mide por la exposición a diferentes ambientes dentro de sus rutinas diarias mencionando de esta forma el impacto que generan épocas de lluvia con temperaturas bajas, mayor pisoteo, menor fotosíntesis, variabilidad y/o cambios bruscos en suplementaciones con el fin de mantener producción, cumplir nutricionalmente con el requerimiento base de los animales y avanzando con factores irreversibles que afectan directamente la producción por animal como lo son las cojeras por exposición a terreno saturado y largas jornadas de camino hasta llegar al lugar destino de ordeño. De igual manera el exceso por estrés calórico resulta demostrar cambios significativos dentro de la producción ya que el extremo invasivo de exposición a altas temperaturas limitan el consumo de alimento y el desgaste de energía utilizada en el proceso de termorregulación con el fin de buscar confort óptimo para cumplir con el objetivo de producción esperado por cada lote de animales y aunque la época seca resulta ser más viable, benigna y llevadera que la época de lluvias, resulta afectar el bienestar expresado en litros de leche por animal.

Un estudio basado en la afectación meteorológica en la producción de la leche en municipios de Colombia menciona que se estima que cuando la temperatura máxima supera los 25°C, el ambiente es estresante para los animales. En condiciones cálidas y de elevada humedad atmosférica se reduce la pérdida de calor por evaporación a través de la piel y del tracto

respiratorio, incrementando el nivel de estrés. La alta humedad también representa un problema sanitario ya que contribuye a la proliferación de patógenos: bacterias, hongos y ectoparásitos (Efecto meteorológico sobre la producción y calidad de la leche en dos municipios de Antioquia-Colombia, 2009); De igual manera, en relación con la calidad de la leche, el estrés por calor representa un factor negativo, dado que los trastornos digestivos y metabólicos alteran su composición química con disminuciones importantes en la concentración de proteína en la leche.

En el otro extremo de la producción se encuentra que en la cuenca lechera del Uruguay, el exceso de lluvias se transformó inmediatamente en una caída de la producción,. El principal problema que enfrentan los hatos es la falta de piso en los cultivos forrajeros, lo que obliga a cuidarlos y apelar a la suplementación. Lo anterior, sumado al deterioro de la caminería interna de los hatos, como consecuencia de la formación de barro, genera un gasto extra de energía que se siente más en los ganados en producción que en las vacas secas. También, se transforman en un problema las enfermedades pódalas derivadas de la humedad y el duro tránsito hacia las salas de ordeño (Efecto meteorológico sobre la producción y calidad de la leche en dos municipios de Antioquia- Colombia, 2009) tal y como se desarrolla dentro de las producciones inmersas dentro del presente estudio

La variabilidad de niveles de ST en leche se ve directamente afectada por cambios que se puedan efectuar en su alimentación a lo largo de su producción, no obstante en un sistema de pastoreo acompañado de suplementación la calidad de biomasa ofrecida es quien de igual manera determina este tipo de componentes en el producto final. Estudios realizados demuestran que, la tasa de degradación de carbohidratos no estructurales juega es fundamental para que se realice la concentración de los sólidos en leche, ya que si esta se realiza muy rápido puede haber acidosis ruminal y el porcentaje de grasa disminuye y si esta es lenta se reduce la digestión

microbiana y la síntesis de proteína. Bajos niveles de fibra en la dieta disminuyen el porcentaje de grasa, sin embargo elevados niveles de fibra deprimen el consumo de materia seca y por ende la producción de leche (Pinzón, 2016)

Los meses de marzo y Junio en relación al MUN y BHB suelen tener un cambio constante drásticamente abrupto sin comportamiento de igualdad entre los parámetros lo cual se puede relacionar al número de partos de los animales estudiados en esta época; de igual manera si bien los individuos utilizados en el estudio presentan comportamiento metabólico atípico por su influencia en # de partos, la época del año considerándose periodo de transición puede ser un factor más que ejerce presión en la síntesis y movilización de nutrientes para finalmente ser convertidos y/o utilizados en ST que finalmente marcarán el producto final obtenido que en este caso es la leche.

Los medios a los que se exponen lo animales se convierten en un factor determinante para su nutrición; la baja disponibilidad de forraje de calidad en épocas secas o de verano resultan ser un punto a tratar desde la suplementación para obtener un producto de calidad, es así como en épocas de invierno es posible contar con un aporte elevado de proteína al consumir pastos tiernos y agradables al paladar del animal pero que pueden desplazar otros factores inmersos en la composición neta de la leche al ir directamente relacionados como lo es en este caso la grasa. La época de lluvia se caracteriza por la buena disponibilidad de alimento que será aprovechado para los animales productores, pero que no duele ser igual de eficiente a lo largo del tiempo ya que el forraje en épocas secas se determina por su aumento en fibras y bajo aprovechamiento en disponibilidad de MS, situación adversa en periodo de lluvia ya que al no contar con las suficientes horas de luz solar para ejecutar su mecanismo de asimilación y síntesis de azúcares

utilizados como nutrientes y expresados en tasas de crecimiento /día entra en un periodo de pausa o latencia dependiendo que tan marcada se vea esta parte del tiempo.

Una vez analizados los meses comprendidos entre Marzo y junio como épocas de lluvia, ANALAC realiza un estudio donde determina que la pérdida de producción de leche oscila desde un mínimo de 200 mil litros/día de acuerdo a empresas acopiadoras, hasta un máximo de 633 mil litros/día. El impacto localizado en la oferta regional puede significar desde un 4% como mínimo hasta 13% como máximo. A partir de estas circunstancias se 20 observan dos efectos diferenciados en el precio de la leche al productor, como resultado de la oleada invernal: por una parte, los precios de la leche no bonificada han tenido un leve reajuste, cercano a unos \$18 pesos, en los meses de abril y mayo. En cambio, la leche bonificada, la más afectada por las inundaciones, tiene un impacto más visible en el precio al productor, el cual ha tenido un reajuste de, al menos, \$ 36 por litro de leche en Abril y Mayo de este año, (entre 2 y 4% del precio vigente antes de las inundaciones) (Suarez y Uribe, 2011). (Malagón, 2011)

7. Conclusiones

Mediante las hipótesis planteadas es claro mencionar que se confirma la hipótesis que los días en leche resultan ser un factor determinante de la variación volumétrica y composicional. El efecto cuadrático de los DEL demuestra que la tasa de involución del epitelio mamario se acelera tras superar el pico de lactancia, lo que exige estrategias de suplementación energética diferenciadas para mitigar la caída en la producción

La productividad del hato bajo condiciones de trópico bajo está supeditada a la estacionalidad climática mientras que la época de lluvias favorece la disponibilidad forrajera y confort térmico, la época de sequía condiciona la calidad composicional a la digestibilidad de la

fibra; Esto concluye la estabilidad de los sólidos totales depende de una gestión nutricional que compense la fluctuación en la calidad de la biomasa entre periodos secos y húmedos.

En cualquier de los dos extremos climáticos se ve reflejada la pérdida-ganancia en cuanto a calidad composicional del producto final tomando como base la calidad y estrategia de suplementación que se implementa en cual sea la época climática que se esté atravesando ya que el principio siempre será el mismo basado en el cuidado de la glándula mamaria en los dos ambientes a los cuales se enfrenta para así indirectamente generar durabilidad del epitelio mamario a lo largo del tiempo para que, de este modo, sea posible mantener una producción estable en los dos ambientes y/o climas que atraviesa el ganado productivo.

Referencias bibliográficas

- Asociación Colombiana de Criadores de Ganado Cebú – ASOREGAN. (2022). Informe de razas bovinas en Colombia. ASOREGAN.
- Barragán, J., & Martínez, P. (2016). La producción lechera en Colombia: avances y desafíos. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 29(2), 123–135.
- Biswal, J., Vijayalakshmy, K., & Rahman, H. (2020). Seasonal variations and its impacts on livestock production systems with a special reference to dairy animals: An appraisal. *Veterinary Science Research*, 2(2), 24–30.
- Castro, J., & Bolívar, D. (2015). Importancia nutricional y ambiental de la ganadería de leche en Colombia. *Revista de Producción Animal*, 27(1), 45–59.
- Federación Colombiana de Ganaderos – FEDEGÁN. (2020). Informe de la ganadería bovina en Colombia: producción de leche. FEDEGÁN.

- Guevara, B., Rivas, M. C., & Silva-Acuña, R. (2020). Calidad higiénico-sanitaria de dos sistemas de ordeño en fincas bovinas ubicadas en el sector Vuelta Larga, municipio Maturín, estado Monagas (Venezuela). *Revista de Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 67(1), 60–71. <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v67n1.87687>
- Hayes, E., Wallace, D., O'Donnell, C., et al. (2023). Trend analysis and prediction of seasonal changes in milk composition from a pasture based dairy research herd. *Journal of Dairy Science*, 106(4), 2326–2337. <https://doi.org/10.3168/jds.2021 21483>
- Instituto Colombiano Agropecuario – ICA. (2024). Censo bovino nacional 2024. ICA.
- Jurado-Gómez, H. A., Solarte-Portilla, C. E., Burgos-Arcos, Á. J., González-Rodríguez, A., & Rosero-Galindo, C. (2020). Relación entre la calidad composicional y sanitaria de la leche de bovinos Holstein del trópico alto de Nariño. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(2), 421–434. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i2.5118>
- López-Carlos, M. A., Hernández-Briano, P., Aguilera-Soto, J. I., Carrillo-Muro, O., Medina-Flores, C. A., Méndez-Llorente, F., & Aréchiga-Flores, C. F. (2023). Effect of milking hygiene, herd size, water hardness and temperature-humidity index on milk quality of dairy farms. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 52, e20210189. <https://doi.org/10.37496/rbz5220210189>
- Mora, L., & Salazar, H. (2012). Costos de producción y productividad en la ganadería de leche en Colombia. *Revista de Economía y Desarrollo Rural*, 10(1), 77–95.
- Nateghi, L., Yousefi, M., Zamani, E., Gholamian, M., & Mohammadzadeh, M. (2014). The effect of different seasons on the milk quality. *European Journal of Experimental Biology*, 4(1), 550–552

- Patiño-Burbano, R. E., Jiménez-Velásquez, S., Cabrera-Cabrera, S. L., Guerrero-Narváez, E. M., Montes-Vergara, J. C., Castro-Rincón, E., Rodríguez-Bautista, J. L., & Parra-Arango, J. L. (2023). Caracterización higiénico-sanitaria de la leche bovina del departamento de Nariño. *Revista MVZ Córdoba*, 28(2), e2895. <https://doi.org/10.21897/rmvz.2895>
- Rincón, G., & Torres, M. (2019). Retos de la producción lechera en Colombia: infraestructura, asistencia técnica y sanidad. *Revista Agropecuaria Colombiana*, 37(2), 89–102.
- Timlin, M., Tobin, J. T., Brodkorb, A., Murphy, E. G., Dillon, P., Hennessy, D., O'Donovan, M., Pierce, K. M., & O'Callaghan, T. F. (2021). The impact of seasonality in pasture based production systems on milk composition and functionality. *Foods*, 10(3), Article 607. <https://doi.org/10.3390/foods10030607>
- Valdivia-Ávila, A. L., Rubio-Fontanills, Y., & Beruvides-Rodríguez, A. (2021). Calidad higiénico-sanitaria de la leche, una prioridad para los productores. *Revista de Producción Animal*, 33(2). <https://revistas.reduc.edu.cu/index.php/rpa/article/view/e3833>
- Vélez Terranova, M., Campos Gaona, R., Salamanca Carreño, A., Velasco Daza, R. A., Arenas Rodríguez, B. A., & Chaparro Ortégón, J. S. (2023). Environmental factors that affect the sanitary and nutritional variability of raw milk in dual purpose livestock systems of Colombian Orinoquia. *Animals*, 13(8), 1385. <https://doi.org/10.3390/ani13081385>
- Asoregan. (16 de November de 2022). *Estas son algunas razas de ganado bovino más distintivas en Colombia - Subasta de Ganado en Colombia*. Recuperado el 29 de January de 2025, de asoregan: <https://www.asoregan.co/2022/11/16/tipos-de-razas-de-ganado-bovino/>
- Efecto meteorológico sobre la producción y calidad de la leche en dos municipios de Antioquia-Colombia. (2009). *SCIELO*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-44492009000100007

ICA . (10 de enero de 2012). Recuperado el 02 de ABRIL de 2026, de <https://www.ica.gov.co/getattachment/0675ddef-933f-4436-95bd-6f757ec88872/2012R17.aspx>

ICA. (2024). Obtenido de <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>

Malagón, J. A. (2011). *Universidad de la Salle*. Obtenido de <https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/0b1ef87f-671e-45dd-8c1d-5600eea94d2e/content>

Mariana Cardona Betancur, S. G. (09 de octubre de 2024). Caracterización de la calidad físicoquímica y composicional de la leche de vaca comercializada en el municipio de Rionegro, Antioquia . *SciELO México*. doi:<https://doi.org/10.47286/10.47286/01211463.624>

Pinzón, L. M. (2016). *Universidad de la Salle* . Obtenido de <https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/a0421877-fc51-4ef5-84d9-dcc44bf24820/content>