

Variaciones metabólicas y endocrinas durante el periparto y primera fase de lactancia en sistemas lecheros en trópico bajo

Metabolic and endocrine variations during peripartum and early lactation in lowland tropical dairy systems

Rómulo Campos-Gaona^{1*}, Adriana Correa-Orozco¹, Mauricio Vélez-Terranova¹

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue caracterizar el estado metabólico de vacas de lechería especializada y doble propósito en condiciones de trópico bajo colombiano, mediante la evaluación de la condición corporal, concentraciones séricas de metabolitos y hormonas, en el periodo de transición y hasta los 105 días posparto, a través de técnicas de análisis multivariadas. Para entender la variación conjunta de hormonas y metabolitos evaluadas durante la fase experimental, las 21 variables en estudio (hemoglobina, hematocrito, NEFA, BHB, glucosa, colesterol, triglicéridos, urea, proteína, albúmina, globulina, AST, ALT, GGT, condición corporal, T3, cortisol, insulina, leptina, prolactina, GH), se analizaron desde un enfoque multivariado. Se realizó un análisis de conglomerados y de componentes principales (ACP) para reducir la dimensionalidad de la información, e identificar las variables representativas para explicar la variación de los datos. Se logró establecer que el agrupamiento de los periodos evaluados en tres conglomerados permitió la unificación de periodos con comportamientos metabólicos y hormonales similares, con un sentido biológico esperado durante y después del parto. El trabajo permitió conocer las concentraciones séricas de metabolitos y hormonas en el periparto y primera fase de la lactancia de vacas lecheras en condiciones tropicales y su agrupamiento por ACP facilitó generar un índice de evaluación multivariado en el puerperio.

Palabras clave: bovinos lecheros, homeostasis, modelos matemáticos, metabolismo, periparto, periodo de transición

¹ Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Departamento de Ciencia Animal, Colombia

* Autor de correspondencia. Rómulo Campos-Gaona; rcamposg@unal.edu.co

Recibido: 8 de marzo de 2024

Aceptado para publicación: 24 de octubre de 2024

Publicado: 20 de diciembre de 2024

©Los autores. Este artículo es publicado por la Rev Inv Vet Perú de la Facultad de Medicina Veterinaria, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original

ABSTRACT

The aim of this study was to characterize the metabolic status of specialized and dual-purpose dairy cows under lowland tropical dairy systems in Colombia, by evaluating body condition, serum concentrations of metabolites and hormones, in the transition period and up to 105 days post-partum, through multivariate analysis techniques. To understand the joint variation of hormones and metabolites evaluated during the experimental phase, the 21 variables under study (haemoglobin, haematocrit, NEFA, BHB, glucose, cholesterol, triglycerides, urea, protein, albumin, globulin, AST, ALT, GGT, body condition, T3, cortisol, insulin, leptin, prolactin, GH), were analysed from a multivariate approach. A cluster analysis and principal component analysis (PCA) were performed to reduce the dimensionality of the information, and to identify the representative variables to explain the variation in the data. It was possible to establish the grouping of the evaluated periods into three clusters, by unifying periods with similar metabolic and hormonal behaviours, with an expected biological sense during and after parturition. The work allowed to know the serum concentrations of metabolites and hormones in the peripartum and first phase of lactation of dairy cows in tropical conditions and their grouping by PCA facilitated the generation of a multivariate evaluation index in the puerperium.

Key words: dairy cows, homeostasis, mathematics models, metabolism, peripartum, transition period

INTRODUCCIÓN

Las vacas lecheras presentan profundos cambios hormonales al final de la gestación e inicio de la lactancia. Mediante estos se promueve el crecimiento de tejidos, se activan mecanismos fisiológicos para el parto y se compensan desafíos endocrinos para mantener la homeostasis y avanzar hacia la homeorresis (Martineau *et al.*, 2013; Spaans *et al.*, 2022). Diversos trabajos puntuales han determinado los cambios hormonales en el periparto y la lactancia; sin embargo, no siempre son de ayuda para conocer valores de referencia o de predicción para vacas en trópico bajo y con cruces o con componentes genéticos mestizos o nativos (Campos *et al.*, 2018; Miku³a *et al.*, 2021).

La condición metabólica de final de la gestación necesariamente obliga a conocer las variaciones de la hormona del crecimiento; asimismo, durante la lactancia, en espe-

cial en la primera fase, hormonas como la insulina, la triyodotironina (T3) y la prolactina podrán indicar los ajustes hacia el pico de producción y primeros días de la producción de leche (Lucy *et al.*, 2014; Fiore *et al.*, 2017). Paralelo a este estado productivo, la reactivación ovárica debe analizarse a partir de la condición corporal, donde las concentraciones de leptina permitirán entender el papel de las reservas de tejido adiposo en el proceso, ayudada por las concentraciones séricas de progesterona (Gross y Bruckmaier, 2019; Kurpińska y Skrzypczak, 2020).

Los cambios metabólicos pueden ser monitoreados desde el final de la gestación hasta la estabilización productiva y reproductiva (Bruinje *et al.*, 2023). En sistemas con limitantes nutricionales o ambientales, las deficiencias energéticas inciden negativamente en la producción láctea y en la dinámica productiva, situación que ha sido evaluada a través de metabolitos asociados con la movilización gluconeogénica, entre

estos el β -hidroxibutirato (BHB) y los ácidos grasos no esterificados (NEFA) (Benedet *et al.*, 2019; Grala *et al.*, 2022). Las vías metabólicas expresan cambios dinámicos, los cuales son indicativos de diversas situaciones de salud y eficiencia productiva y se tornan en indicadores ampliamente empleados para determinar el futuro de vacas en el periodo de transición (Xu *et al.*, 2019).

Es posible usar técnicas de predicción matemática para emplear las concentraciones hormonales como insumos predictivos para generar modelos de simulación que sean útiles para entender los cambios y predecir el comportamiento de la lactancia y la reactivación ovárica (de Koster *et al.*, 2019; Mandujano-Reyes *et al.*, 2021). El uso de modelos asociados con metabolitos se ha considerado como una herramienta potencial para comprender la dinámica fisiológica y analizar la movilización de reservas energéticas, la reposición tisular y la predicción del balance energético (Tremblay *et al.*, 2018).

Tal y como se planteó el uso del índice del periodo de transición (TCI - *Transition Cow Index*) (Nordlund, 2006), es deseable contar con mecanismos de predicción en el posparto que permitan inferir cual sería el futuro productivo y reproductivo de las vacas, según se hayan generado cambios homeorréticos en las primeras semanas de lactancia (Mandujano-Reyes *et al.*, 2021). Dentro de los modelos se encuentran propuestas asociadas a la interfase nutrición-inmunidad (Dänicke *et al.*, 2018), a la posibilidad de uso de biomarcadores (Tremblay *et al.*, 2018; de Koster *et al.*, 2019), a la dinámica del tejido adiposo (Contreras *et al.*, 2017), o al uso de inteligencia artificial y redes neurales (Camargo *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2019; Bauer y Jagusiak, 2022). A través de procedimientos analíticos, se puede obtener información mediante técnicas que permitan la selección y discriminación de variables con pesos relativos altos en la predicción y a partir de los hallazgos interpretar la importancia de los metabolitos o de las hormonas para la respuesta biológica indagada.

Ante esto, el objetivo del presente trabajo fue caracterizar el estado metabólico de vacas de lechería especializada y doble propósito en condiciones de trópico bajo, mediante la evaluación de la condición corporal, concentraciones séricas de metabolitos y hormonas, en el periodo de transición y hasta los 105 días posparto, a través de técnicas de análisis multivariadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se compararon dos sistemas de producción de leche bajo diferentes condiciones de manejo en zonas agroecológicas ubicadas en trópico bajo colombiano, durante los meses de febrero a mayo, correspondientes a una época seca y transición hacia periodo de lluvias. Los predios se encontraban entre los 3°30 a 4°10 N y 76°21 a 76°46 W, correspondiente ecológicamente a una zona de bosque seco tropical de acuerdo con la clasificación de zonas de vida de Holdridge (Holdridge, 1982). El protocolo experimental fue aprobado por el Comité de Ética en Investigación de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira.

El Sistema 1 correspondió a una lechería especializada con cruces F1 *Bos taurus* x *Bos indicus*, en tanto que el Sistema 2 lo constituyó un tipo de ordeño de producción media con una raza sintética trihíbrida (33% Shorthorn, 33% Red Holstein y 33% Hartón del Valle), denominada Lucerna y explotada en sistema silvopastoril intensivo. Los sistemas productivos seleccionados son representativos de los bovinos productores de leche en la región (Cuadro 1). En cada sistema se utilizaron 10 vacas Lucerna o 10 vacas mestizas con potencial lechero derivado de su origen Holstein y Ayrshire en cruce con Gyr lechero, bajo condiciones de trópico bajo (Valle del Cauca, Colombia). Las vacas experimentales se agruparon según fechas esperadas de parto, no habiendo diferencia superior de 15 días entre ellos. La fase de lactancia correspondió a los primeros 105 días. Los ani-

Cuadro 1. Características principales de los sistemas de producción lechera de trópico bajo en estudio (Valle del Cauca, Colombia)

	Sistema 1	Sistema 2
Grupo racial	F1	Lucerna
Tipo de explotación	Semi intensiva	Silvo pastoreo
Vacas en ordeño (n)	250	120
Edad (años)	7	6
Número de partos (n)	4	3
Producción media vaca/día	16 L	12 L
Producción media por lactancia	4,800 L	3,500 L
Tipo de forraje	<i>Cynodon mfluensis</i>	<i>Cynodon mfluensis</i> + <i>Leucaena leucocephala</i>
Suplementación de balanceados	Sí	Sí
Sal mineralizada	<i>Ad libitum</i>	Controlada

F1: Gyr x Holstein o Gyr x Ayrshire

males se mantuvieron en pastoreo rotacional con base en praderas de pasto estrella (*Cynodon mfluensis*). Además, se les suministró agua *ad libitum* y alimento balanceado de acuerdo con la producción láctea. El número de animales se determinó según indicaciones de trabajos en perfiles metabólicos (Rowlands y Pocock, 1976).

En los días -30 y -15 del parto, al parto y en los días 7, 20, 35, 50, 65, 80 y 105 del posparto se tomaron muestras de sangre para hematocrito y análisis sérico de ácidos grasos no esterificados (NEFA), β -hidroxi-butarato (BHBA), glucosa, triglicéridos (TGD), colesterol (Chol), hemoglobina, urea, proteínas totales (PT), albúmina (Alb), globulinas (Glob), aspartato aminotransferasa (AST), alanino aminotransferasa (ALT), gamma glutamil transferasa (GGT), cortisol, triyodotironina (T3), leptina, insulina, prolactina y hormona del crecimiento (GH). El día de la colecta de sangre se evaluó la condición corporal (CC), según escala estándar de 1-5, donde 1 correspondía a animales emaciados y cinco a animales obesos.

Todos los análisis de metabolitos se realizaron mediante pruebas enzimático-colorimétricas y reactivos comerciales (Randox®, Crumlin; UK). Asimismo, se determinó la concentración de hormonas mediante técnica de ELISA y reactivos comerciales (MyBiosource®, USA). Tanto para las pruebas enzimáticas como en las hormonales se emplearon equipos semiautomatizados (RAYTO®, China).

Para entender la variación conjunta de hormonas y metabolitos durante los 10 periodos evaluados de la fase de transición y primera fase de la lactancia, las 21 variables en estudio (hemoglobina, hematocrito, NEFA, BHB, Glu, Chol, TGD, Urea, PT, Alb, Glob, AST, ALT, GGT, CC, T3, cortisol, insulina, leptina, prolactina, GH), se analizaron desde un enfoque multivariado. En una primera fase, se realizó un análisis de conglomerados con las variables estandarizadas para agrupar los periodos con un comportamiento metabólico y hormonal similar. En el análisis se utilizó un agrupamiento jerárquico con el algoritmo *average linkage* y la distancia euclídea. Se eva-

luó la formación de 2 a 5 agrupaciones, y se seleccionó aquella que incluyera más de un periodo por grupo, y la de mayor sentido biológico. Posteriormente, se estimaron estadísticas descriptivas de las hormonas y metabolitos dentro de cada grupo establecido.

En una segunda fase se realizó un análisis de componentes principales (ACP) con el objetivo de reducir la dimensionalidad de la información, e identificar las variables más representativas para explicar la variación de los datos que permitieran caracterizar el comportamiento metabólico y hormonal durante el periodo experimental de vacas lecheras en condiciones de trópico bajo. El ACP se realizó con las variables estandarizadas, usando como criterio de clasificación los agrupamientos previamente establecidos. Solo se interpretaron los componentes que explicarían más del 70% de la variabilidad de la información. Se utilizaron gráficos exploratorios tipo biplots para representar la relación de los componentes principales.

Finalmente, se realizó el análisis de varianza multivariada para evaluar la existencia de diferencias estadísticas en los niveles de metabolitos y hormonas entre las vacas de las fincas evaluadas. Las fincas fueron comparadas dentro los periodos previamente agrupados. En cada caso, se revisó la normalidad de las variables, y se transformaron aquellas que no se ajustaban ($\log_{10}$ o raíz cuadrada) para garantizar una distribución aproximadamente normal. De igual forma, se corrigió la multicolinealidad, identificando variables altamente correlacionadas ($r > 0.80$) y dejando solo una de ellas dentro del análisis. Para identificar las diferencias entre fincas se utilizaron los estadísticos de Wills, Pillai, Lawley-Hotelling y Roy ($p < 0.05$), y para la diferenciación de medias multivariadas se usó la prueba de Hotelling corregida. Todos los análisis se hicieron en el software Infostat (di Rienzo *et al.*, 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Agrupamiento de los periodos de análisis

Entre los análisis de conglomerados realizados, se logró establecer que el agrupamiento de los periodos evaluados en tres bloques permitió la unificación de periodos con comportamientos metabólicos y hormonales similares, con un sentido biológico esperado, ya que los grupos conformados estuvieron distribuidos antes, durante y después del parto. La Figura 1 muestra el dendograma del análisis, donde se observa que el grupo 1 estuvo conformado por los periodos preparto (1 y 2); el grupo 2 correspondió a los periodos asociados con el parto y día 5 posparto (3 y 4), mientras que el grupo 3 incluyó todos los periodos posparto (5 al 10). Estos resultados concuerdan con lo esperado con relación a las variaciones hormonales y endocrinas fisiológicas durante el periparto, dado que estas se derivan de los cambios en los procesos de gestación e inicio de lactancia para los grupos 1 y 2, mientras que el grupo 3 reunió los periodos en los que la persistencia de la lactancia sigue el patrón esperado (Tremblay *et al.*, 2018; Mezzeti *et al.*, 2021).

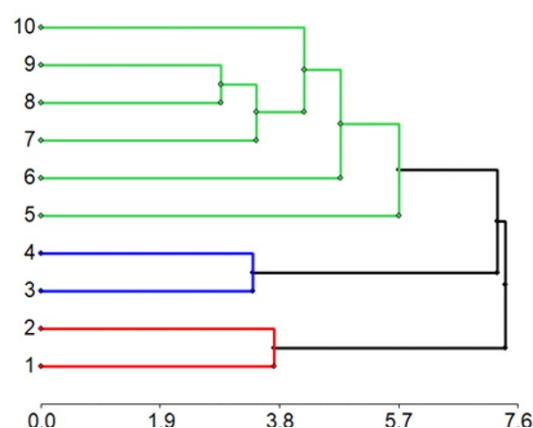


Figura 1. Dendograma del análisis metabólico y hormonal de los 10 periodos (preparto, parto, posparto), durante la fase de transición de vacas lecheras bajo condiciones de trópico bajo (Valle del Cauca, Colombia)

Las estadísticas descriptivas dentro de cada agrupamiento se muestran en el Cuadro 2. Las concentraciones de los metabolitos presentan variaciones esperadas según el cambio endocrino y metabólico en el postparto temprano y la lactancia (Wisniewski *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2019). Se resalta la importancia de hemoglobina y del hematocrito para vacas en trópico, variables que por efectos asociados a desafíos medioambientales presentan alto riesgo sobre el componente sanguíneo (Vallejo-Timarán *et al.*, 2020; Campos *et al.*, 2022); asimismo, metabolitos y parámetros hemáticos permiten predecir comportamientos adaptativos y productivos (Musco *et al.*, 2020).

ACP de variables metabólicas y hormonales

La Figura 2 muestra el Biplot del ACP de los datos metabólicos y hormonales durante el periodo de transición. Los dos primeros componentes permitieron explicar el 72% de la variabilidad de la información y, por lo tanto, solo se interpretarán estas componentes.

La CP1 explicó el 38.7% de la variación (Figura 2). Se observa que altos valores en este componente estuvieron asociados a una mayor concentración de hemoglobina, hematocrito y CC (autovectores positivos más

Cuadro 2. Estadísticas descriptivas del comportamiento metabólico y hormonal durante la fase de transición de vacas lecheras en condiciones de trópico bajo (Valle del Cauca, Colombia)

Variable	Grupo 1 (n=31)					Grupo 2 (n=31)					Grupo 3 (n=96)				
	Media	DE	CV	Mín	Máx	Media	DE	CV	Mín	Máx	Media	DE	CV	Mín	Máx
Hemoglobina(g/dL)	10.8	1.2	11.5	8.4	13.5	11.6	0.9	8.0	9.8	13.0	10.3	1.0	9.5	7.7	12.8
Hematocrito (%)	30.1	2.3	7.6	27.0	37.0	31.3	2.3	7.3	27.0	35.0	27.6	2.4	8.5	21.0	34.0
NEFA (mmol/L)	0.6	0.2	35.2	0.4	1.3	0.9	0.3	31.8	0.4	1.6	0.6	0.2	36.3	0.4	1.4
BHB (mmol/L)	0.5	0.1	28.8	0.2	0.7	0.8	0.3	36.8	0.4	1.7	0.8	0.3	39.3	0.3	2.2
Glu (mmol/L)	3.4	0.4	12.6	2.5	4.0	3.0	1.1	35.9	1.7	6.0	2.9	0.6	20.8	1.6	4.8
Chol (mmol/L)	2.9	0.5	17.7	2.1	4.0	2.5	0.6	23.1	1.4	3.6	4.9	1.2	24.4	2.7	8.3
TGD (mmol/L)	0.4	0.1	30.1	0.2	0.6	0.2	0.1	36.1	0.0	0.3	0.2	0.1	31.7	0.1	0.5
Urea (mmol/L)	5.4	1.1	20.4	2.7	8.6	5.6	1.0	18.6	3.9	7.5	6.4	2.1	32.9	2.4	11.0
PT (g/L)	74.6	6.7	9.0	64.4	91.4	69.3	4.5	6.5	60.3	78.5	76.8	6.7	8.7	59.2	96.7
Alb (g/L)	31.6	2.5	7.9	26.8	35.3	34.2	3.1	9.1	28.0	45.2	33.9	3.0	8.8	21.3	42.4
Glob (g/L)	41.0	8.2	19.1	29.6	64.6	35.5	5.4	15.2	24.0	47.3	43.3	7.0	16.1	25.1	57.6
AST (U/L)	61.0	11.0	18.1	42.5	82.7	83.4	29.5	35.3	55.0	198.2	81.5	13.8	17.0	56.2	122.8
ALT (U/L)	23.5	3.9	16.7	13.9	34.7	19.7	3.2	16.2	13.8	26.0	26.8	7.7	28.8	12.0	45.1
GGT (U/L)	26.0	5.3	20.2	13.5	36.7	26.1	6.0	23.0	16.1	42.8	37.4	11.6	31.1	18.0	74.4
CC	3.5	0.4	11.4	2.8	4.3	3.2	0.3	10.2	2.8	3.8	2.8	0.2	8.0	2.3	3.5
T3 (nmol/L)	0.9	0.2	16.3	0.5	1.2	0.8	0.2	19.5	0.5	1.1	0.8	0.2	21.5	0.2	1.1
Cortisol (nmol/L)	61.2	32.8	38.4	4.3	44.0	68.2	13.6	37.5	1.7	36.2	49.1	39.1	56.5	1.6	63.9
Insulina (pmol/L)	56.9	19.5	24.1	2.2	15.6	3.0	8.33	9.7	0.9	5.9	5.8	19.4	28.4	2.2	21.1
Leptina (ng/mL)	6.7	1.5	22.3	3.8	10.5	6.6	3.0	45.1	3.3	18.9	9.7	4.3	44.7	3.1	22.6
Prolactina (ng/mL)	12.6	3.7	29.3	4.6	20.9	13.5	4.1	30.5	4.8	23.6	13.1	4.5	34.5	4.8	25.0
GH (ng/mL)	5.6	2.1	36.5	2.6	10.2	5.0	1.8	35.9	3.0	9.5	5.2	2.0	37.8	2.5	9.9

NEFA: Ácidos grasos no saturados; BHB: β -hidroxibutirato; Glu: glucosa; Chol: colesterol; TGD: triglicéridos; PT: proteína; Alb: Albúmina; Glob: Globulina; AST: Aspartato sorbitol transferasa; ALT: Alanino aminotransferasa; GGT: Gamma glutamil transferasa; CC: condición corporal; T3: Triyodotironina; GH: Hormona del crecimiento

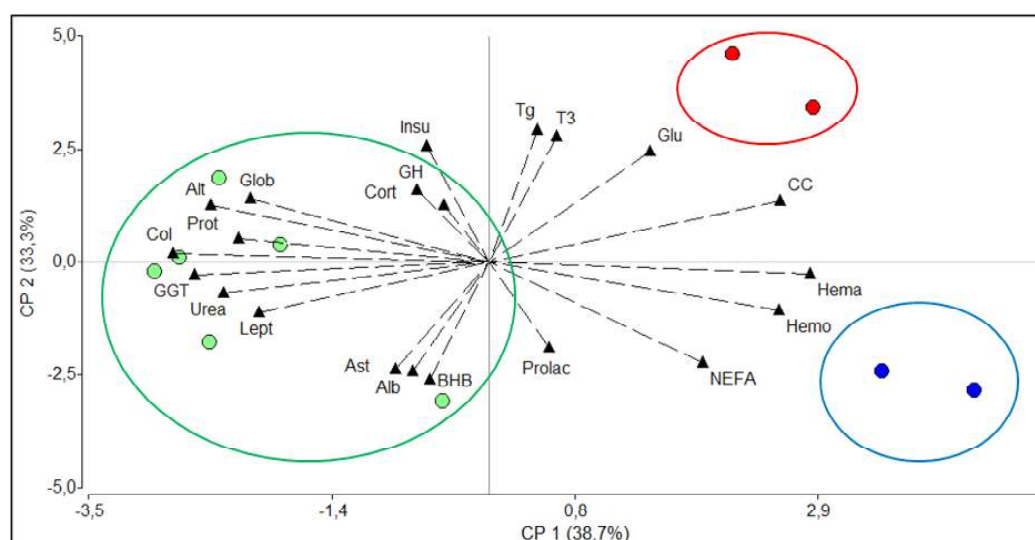


Figura 2. Análisis de Componentes Principales (ACP) de datos de metabolitos y hormonas durante el periodo de transición de vacas lecheras bajo trópico bajo. CP: componente principal; NEFA: Ácidos grasos no saturados; BHB: β -hidroxibutirato; Glu: Glucosa; Col: Colesterol; Tg: Triglicéridos; Prot: Proteína; Alb: Albúmina; Glob: Globulina; AST: Aspartato sorbitol transferasa; ALT: Alanino aminotransferasa; GGT: Gamma glutamil transferasa; CC: Condición corporal; T3: Triyodotironina; GH: Hormona del crecimiento; Prolac: Prolactina; Lept: Leptina. Hema: Hemoglobina; Hemo: Hematocrito. Grupo 1: periodos 1 y 2 (puntos rojos); Grupo 2: periodos 3 y 4 (puntos azules); Grupo 3: periodos 5 a 10 (puntos verdes)

altos entre 0.31 a 0.34, Cuadro 3), que se observaron en el preparto (grupo 1 – puntos rojos) y parto (grupo 2 – puntos azules). De manera opuesta, se encontró que variables como colesterol y GGT presentaron bajos valores en la CP1 (autovectores negativos más bajos entre -0.31 a -0.33, Cuadro 3), los cuales estuvieron asociados al periodo posparto (grupo 3 – puntos verdes), especialmente entre los periodos 6 al 10. La contraposición descrita indica correlaciones negativas entre las variables, asociación que permite visualizar mecanismos de control homeostático en especial para componentes hemáticos, proteicos y energéticos tal como se ha encontrado en otros trabajos (Tremblay *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2019; Giannuzzi *et al.*, 2022).

La CP2 explicó el 33.3% de la variación de la información (Figura 2). Altos valores en este componente estuvieron asociados a mayores niveles de insulina, TGD y T3 (autovectores positivos más altos entre 0.31 a 0.35) observados durante el preparto (grupo 1 - puntos rojos) y el periodo 10 del posparto. Por su parte, el BHB presentó los valores más bajos en la CP2 (autovectores más negativos -0.32, Cuadro 3) y se encontraron relacionados con el parto (grupo 2 – puntos azules) y los periodos 5 y 6 posparto. En otros trabajos, NEFA y BHB han sido metabolitos con capacidad predictora para cambios fisiológicos en el periparto (Mandujano-Reyes *et al.*, 2021), análisis de actividad ovárica y desempeño reproductivo (Bruinjé *et al.*, 2023); igualmente insulina y

Cuadro 3. Autovectores de las variables analizadas durante la fase de transición de vacas lecheras en condiciones de trópico bajo (Colombia) en el Biplot de dos componentes principales

Variables	CP1	CP2
Hemoglobina	0.31	-0.13
Hematocrito	0.34	-0.03
Ácidos grasos no saturados	0.23	-0.27
β -hidroxibutirato	-0.06	-0.32
Glucosa	0.17	0.29
Colesterol	-0.33	0.02
Triglicéridos	0.05	0.35
Urea	-0.28	-0.08
Proteína	-0.27	0.06
Albúmina	-0.08	-0.29
Globulinas	-0.25	0.17
Aspartato sorbitol transferasa	-0.1	-0.29
Alanino aminotransferasa	-0.29	0.15
Gamma glutamil transferasa	-0.31	-0.03
Condición corporal	0.31	0.16
Triyodotironina	0.07	0.34
Cortisol	-0.08	0.19
Insulina	-0.07	0.31
Leptina	-0.24	-0.13
Prolactina	0.06	-0.23
Hormona del crecimiento	-0.05	0.15

CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2

BHB han sido seleccionados como predictores de estado metabólico en modelos de algoritmos de aprendizaje automático (Xu *et al.*, 2019).

De acuerdo con el análisis de los dos primeros componentes principales, se evidencia que, de las 21 variables metabólicas y hormonales incluidas en el estudio, nueve permiten explicar el 72% de la variabilidad de la información; Cortisol y GH no exhiben importancia para ninguno de los dos primeros componentes, ya que sus valores son ba-

jos. Existe coincidencia entre las variables que explican en mayor porcentaje la distribución en los componentes principales; por ejemplo, la condición corporal, BHB, los componentes sanguíneos, insulina, T3, colesterol y triglicéridos.

Los indicadores sanguíneos hemoglobina y hematocrito presentaron estrecha correlación, entre los dos, pero por presentar una mejor opción que evalúa el metabolismo y el balance hídrico se prefiere trabajar con el hematocrito en los parámetros hemáticos (Vallejo-Timarán *et al.*, 2020; Campos *et al.*, 2022). Asimismo, la participación de los indicadores del metabolismo energético, donde el BHB y los NEFA indican directamente el balance energético negativo y la movilización de tejido adiposo compensatoria. Similar hallazgo se ha encontrado en otros trabajos (Contreras *et al.*, 2017; Fiore *et al.*, 2018; Spaans *et al.*, 2022).

En el componente principal 2, la participación de las hormonas insulina y T3 permiten analizar su importancia en la producción lechera, sin que el nivel de producción modifique este comportamiento en los sistemas productivos analizados. Frente a la insulina diversos trabajos muestran su rol en el control endocrino del metabolismo energético (Spaans *et al.*, 2022; Salamone *et al.*, 2023).

Diferencias metabólicas y hormonales entre sistemas productivos

Los resultados del análisis multivariado de la varianza por agrupamiento establecido incluyendo las variables más representativas obtenidas a partir del ACP se muestran en el Cuadro 3. Las principales variaciones se reflejan en hematocrito, hemoglobina, colesterol, triglicéridos, BHB, GGT, T3, insulina y en condición corporal. Se ha demostrado que existen profundos cambios endocrinos y metabólicos durante el parto y estos son un desafío para la homeostasis de las vacas lecheras (Xu *et al.*, 2019; García-Alegría *et al.*, 2021), aun cuando las producciones lácteas no sean elevadas, lo que se refleja en el presente estudio.

Se encontró diferencia estadística significativa entre sistemas de producción de leche en el componente hormonal (Cuadro 3). En estos, la insulina y T3 tuvieron mayores concentraciones en el sistema 1 en el grupo alrededor del parto, mientras que T3 tuvo mayor concentración en el sistema 2, en la medida que la lactancia avanzó, mostrando que el efecto ambiental incide sobre el control de la termorregulación a través de la T3 (Fiore *et al.*, 2017; Steinhoff *et al.*, 2019). El BHB muestra ser un indicador sensible en cualquiera de los sistemas (Ruprecht *et al.*, 2018; Mandujano-Reyes 2021). Hemoglobina y hematocrito pueden ser parámetros a tener en cuenta por su ajuste homeostático y la facilidad de su determinación (Vallejo-Timarán *et al.*, 2020; Campos *et al.*, 2022).

Igualmente, se analiza en forma gráfica (Figura 3) las variaciones para la totalidad de las variables en las concentraciones de los analitos entre los dos sistemas de producción estudiados. El resultado permite ver las diferencias entre los sistemas, variables que se asocian al nivel de producción láctea (dife-

rencias en NEFA y BHB) y de la respuesta adaptativa asociada con la raza y el tipo de sistema productivo, como se deriva de la T3 (Fiore *et al.*, 2017). En la gráfica, cada línea representa una variable y la longitud representa su magnitud. Este análisis multivariado permite una rápida indicación visual de las relaciones entre los metabolitos y las hormonas y las diferencias derivadas del tipo productivo y el efecto ambiental.

Un alto número de indicadores metabólicos ofrecieron limitada información de las rutas bioquímicas relacionadas con la dinámica homeorrética y, en algunos casos, sus correlaciones permitieron seleccionar las de mayor respuesta fisiológica. Sin embargo, el uso de análisis estadísticos logró tamizar entre los metabolitos y hormonas los que ofrecen una mejor respuesta. Así, se puede avanzar en construir índices de impacto que se pueden emplear en rutinas de manejo, alimentación, salud y producción durante el periparto (Tremblay *et al.*, 2018; De Koster *et al.*, 2019; Mandujano-Reyes *et al.*, 2021).

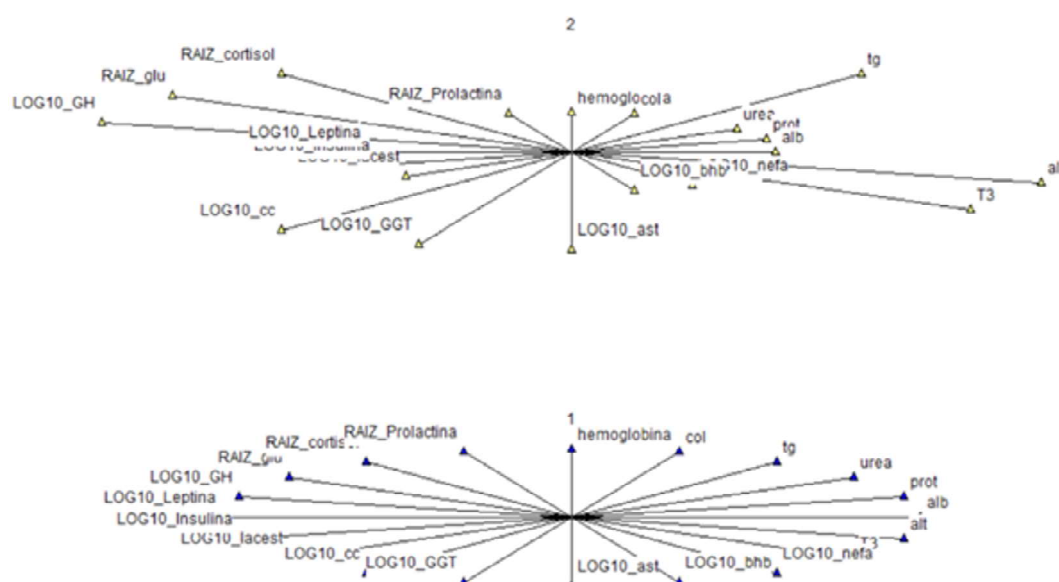


Figura 3. Diagrama de estrellas con el análisis por finca para las variables de respuesta (hormonas y metabolitos), frente a dos sistemas de producción lechera en el trópico bajo de Colombia

CONCLUSIONES

- Se presentan las concentraciones séricas de metabolitos y hormonas en el periparto y primera fase de la lactancia de vacas lecheras en condiciones tropicales.
- El análisis de componentes principales (ACP) permitió identificar nueve de las 21 variables analizadas que más contribuyen a explicar el comportamiento metabólico y hormonal (72%). El ACP permite generar un índice de evaluación multivariado en el puerperio.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Colciencias-Colombia la financiación parcial del trabajo, a través de la convocatoria 727, mediante el proyecto titulado «Modelo determinístico para evaluar el estado metabólico: respuestas homeostáticas y homeorréticas en vacas lecheras en trópico bajo». Asimismo, expresan su reconocimiento a los propietarios y trabajadores de los sistemas productivos que facilitaron la fase experimental.

LITERATURA CITADA

1. **Bauer EA, Jagusiak W. 2022.** The use of multilayer perceptron artificial neural networks to detect dairy cows at risk of Ketosis. *Animals* 12: 332. doi: 10.3390/ani12030332
2. **Benedet A, Manuelian CL, Zidi A, Penasa M, De Marchi M. 2019.** Invited review: β -hydroxybutyrate concentration in blood and milk and its associations with cow performance. *Animal* 13: 1676-1689. doi: 10.1017/S175173111900034X
3. **Bruinjé TC, Morrison EI, Ribeiro E S, Renaud D L, Serrenho RC, LeBlanc SJ. 2023.** Postpartum health is associated with detection of estrus by activity monitors and reproductive performance in dairy cows. *J. Dairy Sci* 106: 9451-9473. doi: 10.3168/jds.2023-23268
4. **Camargo SDS, de Azambuja RCC, Feijó JDO, Corrêa MN, Schneider A, Cardoso FF. 2015.** Modelagem computacional de indicadores metabólicos para estudo de eficiência reprodutiva em vacas de corte. In: X Congresso Brasileiro de Agroinformática. Brasil:
5. **Campos R, Vélez M, García K, Correa A, Ordoñez AL. 2022.** Statistical analysis alternatives to validate hematic parameters in dairy under tropical conditions. *Rev Cienc Agríc* 39: 20-34. doi: 10.22267/rcia.202239e.193
6. **Campos R, Correa A, Zambrano GL, Ospina A. 2018.** Alteraciones bioquímicas y metabólicas en el periodo de transición en vacas lecheras. *Rev Invest Agraria Amb* 9: 165-179.
7. **Contreras GA, Strieder-Barboza C, Raphael W. 2017.** Adipose tissue lipolysis and remodeling during the transition period of dairy cows. *J Anim Sci Biotechnol* 8: 41. doi: 10.1186/s40104-017-0174-4
8. **Dänicke S, Meyer U, Kersten S, Frahm J. 2018.** Animal models to study the impact of nutrition on the immune system of the transition cow. *Res Vet Sci* 116: 15-27. doi: 10.1016/j.rvsc.2018.01.023
9. **De Koster J, Salavati M, Grelet C, Crowe MA, Matthews E, O'Flaherty R, Opsómero G, et al. 2019.** Prediction of metabolic clusters in early-lactation dairy cows using models based on milk biomarkers. *J Dairy Sci* 102: 2631-2644. doi: 10.3168/jds.2018-15533
10. **Di Rienzo J, Balzarini M, Gonzalez L, Casanoves F, Tablada M, Walter Robledo C. 2010.** Infostat: software para análisis estadístico. [Internet]. Available in: <https://repositorio.-catie.ac.cr/handle/11554/10346>
11. **Fiore E, Piccione G, Rizzo M, Morgante M, Barberio A, Giudice E, Ganesella M. 2018.** Adaptation of some energetic parameters during transition period in dairy cows. *J Appl Anim Res* 46: 402-405. doi: 10.1080/09712119.2017.1313742

12. **Fiore E, Giambelluca S, Morgante M, Piccione G, Vazzana I, Contiero B, Orefice T, et al. 2017.** Changes in thyroid hormones levels and metabolism in dairy cows around calving. *Acta Vet Brno* 67: 318-330. doi: 10.1515/acve-2017-0026
13. **García K, Campos R, Vélez, M, Hernández EA. 2021.** Insulin resistance indexes of grazing cows and mineral or vitamin supplementation under tropical conditions. *Open Vet J* 11: 587-597. doi: 10.5455/OVJ.2021.v11.i4.8
14. **Giannuzzi D, Mota LFM, Pegolo S, Gallo L, Schiavon S, Tagliapietra F, Katz G, Fainboym D, et al. 2022.** In-line near-infrared analysis of milk coupled with machine learning methods for the daily prediction of blood metabolic profile in dairy cattle. *Sci Rep* 12: 8058. doi: 10.1038/s41598-022-11799-0
15. **Grala T M, Kuhn-Sherlock B, Roche JR, Jordan OM, Phyn CVC, Burke CR, Meier S. 2022.** Changes in plasma electrolytes, minerals, and hepatic markers of health across the transition period in dairy cows divergent in genetic merit for fertility traits and postpartum anovulatory intervals. *J. Dairy Sci* 105: 1754-1767. doi: 10.3168/jds.2021-20783
16. **Gross JJ, Bruckmaier RM. 2019.** Invited review: Metabolic challenges and adaptation during different functional stages of the mammary gland in dairy cows: Perspectives for sustainable milk production. *J. Dairy Sci* 102: 2828-2843. doi: 10.3168/jds.2018-15713
17. **Holdridge L. 1982.** Ecología basada en zonas de vida. San José (Costa Rica): Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 76 p.
18. **Kurpińska A, Skrzypczak W. 2020.** Hormonal changes in dairy cows during periparturient period. *Acta Sci Pol Zoo-technica* 18: 13-22. doi: 10.21005/asp.2019.18.4.02
19. **Lucy MC, Butler ST, Garverick HA. 2014.** Endocrine and metabolic mechanisms linking postpartum glucose with early embryonic and foetal development in dairy cows. *Animal* 8(Suppl 1): 82-90. doi: 10.1017/S1751731114000482
20. **Mandujano-Reyes JM, Walleiser E, Hachenberg S, Gruber S, Kammer M, Baumgartner C, Mansfeld R, et al. 2021.** Full model selection using regression trees for numeric predictions of biomarkers for metabolic challenges in dairy cows. *Prev Vet Med* 193: 105422. doi: 10.1016/j.prevetmed.-2021.105422
21. **Martineau GP, Le Treut Y, Guillou D, Waret-Szkuta A. 2013.** Postpartum dysgalactia syndrome: A simple change in homeorhesis? *J Swine Health Prod* 21: 85-93.
22. **Mezzeti M, Cattaneo L, Pasamonti M, Lopreato V, Minuti A. 2021.** The transition period updated: a review of the new insights into the adaptation of dairy cows to the new lactation. *Dairy* 2: 617-636. doi: 10.3390/dairy2040048
23. **Mikuś R, Pruszyńska-Oszmałek E, Pszczola M, Rż'sińska J, Sassek M, Nowak KW, Nogowski L, Kołodziejki PA. 2021.** Changes in metabolic and hormonal profiles during transition period in dairy cattle—the role of spexin. *BMC Vet Res* 17: 359. doi: 10.1186/s12917-021-03069-4
24. **Musco N, Tudisco R, Grossi M, Mastellone V, Morittu VM, Pero ME, Wanapat M, et al. 2020.** Effect of a high forage: concentrate ratio on milk yield, blood parameters and oxidative status in lactating cows. *Anim Prod Sci* 60: 1531-1538. doi: 10.1071/AN18041
25. **Nordlund K. 2006.** Transition cow index™. In: American Association of Bovine Practitioners Conference Proceedings. USA. doi: 10.21423/aabppro-20064694
26. **Rowlands GJ, Pocock RM. 1976.** Statistical basis of the Compton metabolic profile test. *Vet Rec.* 98: 333-338. doi: 10.1136/vr.98.17.333
27. **Rupprechter G, de Lourdes Adrien M Larriestra A, Meotti O, Batista C, Meikle A, Noro M. 2018.** Metabolic predictors of peri-partum diseases and their association with parity in dairy

- cows. *Res Vet Sci* 118: 191-198. doi: 10.1016/j.rvsc.2018.02.005
28. **Salamone M, Adriaens I, Liseune A, Heirbaut S, Jing XP, Fievez V, Vandaele L, et al. 2023.** Milk yield residuals and their link with the metabolic status of dairy cows in the transition period. *J Dairy Sci* 107: 317-330. doi: 10.3168/jds.2023-23641
29. **Spaans OK, Kuhn-Sherlock B, Hickey A, Crookenden MA, Heiser A, Burke CR, Phyn CVC, et al. 2022.** Temporal profiles describing markers of inflammation and metabolism during the transition period of pasture-based, seasonal-calving dairy cows. *J Dairy Sci* 105: 2669-2698. doi: 10.3168/jds.2021-20883
30. Steinhoff L, Jung K, Meyerholz MM, Heidekorn-Dettmer J, Hoedemaker M, Schmicke M. 2019. Thyroid hormone profiles and TSH evaluation during early pregnancy and the transition period in dairy cows. *Theriogenology* 129: 23-28. doi: 10.1016/j.theriogenology.2019-01.023
31. **Tremblay M, Kammer M, Lange H, Plattner S, Baumgartner C, Stegeman,JA, Döpfer D. 2018.** Identifying poor metabolic adaptation during early lactation in dairy cows using cluster analysis. *J Dairy Sci* 101: 7311-7321. doi: 10.3168/jds.2017-13582
32. **Vallejo-Timarán D, Montoya-Zuluaga J, Castillo-Vanegas V, Maldonado-Estrada J. 2020.** Parity and season affect hematological, biochemical, and milk parameters during the early postpartum period in grazing dairy cows from high-tropics herds. *Heliyon* 6: e04049. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04049