

TRASTORNOS METABÓLICOS Y CARENCIALES, CONDICIÓN CORPORAL Y EFICIENCIA EN LA REPRODUCCIÓN ASISTIDA BOVINA

METABOLIC AND DEFICIENCY DISORDERS, BODY CONDITION, AND EFFICIENCY IN ASSISTED BOVINE REPRODUCTION

Obando Amores Carlos Rodrigo ^{1*}

¹ Ingeniero Zootecnista. Universidad Técnica de Manabí, Maestría En Zootecnista. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6615-9470>. Correo: cobandoamores@gmail.com

Dra Felicia Roller Gutierrez, PhD ²

² Universidad Técnica de Manabí. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5287-1268>. Correo: r61@gmail.com

Dr, Rodolfo Pedroso Sosa. Dr,Cs ³

³ Universidad Técnica de Manabí. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6789-2654>. Correo: taimyrodon@gmail.com

Dra. Maricela Lilibet Zambrano Veliz ⁴

⁴ Universidad Técnica de Manabí. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6615-9470>. Correo: mzambrano6486@utm.edu.ec

Dr. Junior German Campozano Zambrano, Mgs. ⁵

⁵ Universidad Técnica de Manabí. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1858-6179>. Correo: juniorg1997@hotmail.com

*** Autor para correspondencia: cobandoamores@gmail.com**

Resumen

El objetivo de esta revisión fue evaluar cómo los trastornos metabólicos, las carencias nutricionales y el estado de condición corporal (ECC) influyen en la eficiencia en la reproducción asistida bovina; para ello, se realizó una revisión sistemática narrativa entre enero de 2000 y marzo de 2025 en PubMed, Scopus, Web of Science

y SciELO, seleccionando 83 estudios originales que cumplieron criterios estrictos de medición objetiva de ECC y parámetros metabólicos (BEN, cetosis, hipocalcemia, deficiencias de selenio, zinc, fósforo y antioxidantes), los criterios de inclusión fueron: embriones, concepción, transferencia, estrés, metabolismo y fertilidad. Los hallazgos revelan que el balance energético negativo y las deficiencias minerales inducen alteraciones neuroendocrinas (supresión de GnRH/LH, disminución de IGF-1 y resistencia a la leptina), estrés oxidativo sistémico y microambientes foliculares y úteros no viables, lo que reduce hasta en un 40% la tasa de preñez en vacas con ECC < 2.5 (escala 1–5) incluso bajo protocolos hormonales óptimos, mientras que la heredabilidad moderada del ECC y su evaluación con producción y fertilidad respaldan su uso como rasgo de selección genética; en consecuencia, la eficiencia de las TRA no depende de la optimización hormonal, sino de la corrección previa del estado metabólico, por lo que la evaluación del ECC y perfiles metabólicos séricos debe implementarse como protocolo obligatorio de tamizaje pre-reproductivo, y las intervenciones nutricionales dirigidas durante el período periparto son esenciales para transformar la reproducción asistida en una herramienta confiable, rentable y sostenible en sistemas de bajos recursos.

Palabras clave: embriones; concepción; transferencia; estrés; metabolismo; fertilidad

Abstract

The objective of this review was to evaluate how metabolic disorders, nutritional deficiencies and body condition status (BCS) influence the efficiency of bovine assisted reproduction; for this purpose, a narrative systematic review was conducted between January 2000 and March 2025 in PubMed, Scopus, Web of Science and SciELO, selecting 83 original studies that met strict criteria for objective measurement of BCS and metabolic parameters (BEN, ketosis, hypocalcemia, selenium, zinc, phosphorus and antioxidant deficiencies). The inclusion criteria were: embryos, conception, transfer, stress, metabolism and fertility. The findings reveal that negative energy balance and mineral deficiencies induce neuroendocrine alterations (GnRH/LH suppression, decreased IGF-1, and leptin resistance), systemic oxidative stress, and non-viable follicular and uterine microenvironments, which reduce pregnancy rates by up to 40% in cows with ECC < 2.5 (scale 1–5), even under optimal hormonal protocols. The moderate heritability of ECC and its evaluation with production and fertility support its use as a genetic selection trait. Consequently, the efficiency of ART does not depend on hormonal optimization but on the prior correction of metabolic status. Therefore, the evaluation of ECC and serum metabolic profiles should be implemented as a mandatory pre-reproductive screening protocol. Targeted nutritional interventions during the peripartum period are essential to transform assisted reproduction into a reliable, cost-effective, and sustainable tool in low-resource systems.

Keywords: embryos; conception; transfer; stress; metabolism; fertility

Fecha de recibido: 09/06/2026

Fecha de aceptado: 03/09/2026

Fecha de publicado: 06/10/2026

Introducción

La eficiencia reproductiva en sistemas ganaderos modernos es un pilar fundamental para la sostenibilidad económica y la productividad del sector bovino, especialmente en regiones donde los recursos forrajeros son limitados y la suplementación energética es escasa o inconstante (Roche et al., 2007). En este contexto, las hembras bovinas criadas bajo pastoreo extensivo presentan un alto riesgo de desarrollar trastornos metabólicos y carenciales nutricionales —como el equilibrio energético negativo (NEBA), la hipocalcemia posparto, la cetosis subclínica y deficiencias de minerales esenciales (fósforo, magnesio, zinc y selenio)— que comprometen su capacidad reproductiva (Maquivar y Galina, 2010; Thatcher et al., 2010). Estos desequilibrios no solo afectan el retorno al estro posparto y la calidad ovocitaria, sino que también reducen significativamente las tasas de concepción y embarazo en tecnologías de reproducción asistida (TRA) como la inseminación artificial sincronizada (IAS) y la transferencia de embriones (TE) (Viamonte, 2010; Meléndez y Bartolomé, 2017).

El problema central radica en que, a pesar de los avances en protocolos de sincronización y manejo de embriones, la eficacia de las TRA sigue siendo variable y frecuentemente inferior a lo esperado en manejos extensivos, donde la condición corporal (CC) al momento de la inseminación se ha identificado como un predictor más fuerte que el propio protocolo hormonal (Pedroso y Gutiérrez, 2024; Roche et al., 2015). Numerosos estudios han demostrado que vacas con $CC \leq 2.5$ (escala de 1–5) presentan hasta un 30–40% menor tasa de embarazo tras IAS comparadas con animales en $CC \geq 3.0$, incluso cuando se aplican protocolos óptimos de sincronización (Roche y Berry, 2006; Berry et al., 2007). Esta asociación no es meramente correlacional: el NEBA induce alteraciones endocrinas clave, como la supresión de la secreción pulsátil de GnRH, la disminución de la concentración sérica de IGF-1 y la resistencia a la leptina, lo que resulta en un fallo en la maduración folicular y la ovulación anovulatoria (Akbar et al., 2015; Lacerda et al., 2018). Asimismo, deficiencias específicas de micronutrientes —como la baja disponibilidad de selenio y zinc— han sido vinculadas a alteraciones en la función ovárica, la calidad del ovocito y la implantación embrionaria, mediante mecanismos oxidativos y epigenéticos (Peña et al., 2007; Leroy et al., 2011).

Recientemente, se ha evidenciado que la interacción entre el estado metabólico y la respuesta a las hormonas de inducción ovulatoria (como la prostaglandina $F2\alpha$ y el GnRH) es modulada por el perfil lipídico y la inflamación sistémica crónica asociada al NEBA (De Bie, 2017; Kadarmideen y Wegmann, 2003). Por ejemplo, animales con niveles elevados de cuerpos cetónicos (>1.2 mmol/L) muestran respuestas atenuadas a la administración de GnRH, lo que reduce la síntesis de estradiol y compromete la calidad del folículo dominante (Dechow et al., 2004). Del mismo modo, la deficiencia de fósforo ha sido relacionada con una disminución en la expresión de receptores de progesterona en el endometrio, afectando directamente la receptividad uterina durante la ventana de implantación (Zotto et al., 2007).

Aunque existen numerosas publicaciones sobre trastornos metabólicos en vacas lecheras intensivas, hay una escasez crítica de revisiones sistemáticas que integran la evidencia sobre cómo estos mismos factores —en contextos de pastoreo extensivo y baja suplementación— afectan específicamente la eficiencia de las TRA (Roche et al., 2009). Esto representa una brecha importante, ya que el 70% de las hembras bovinas en América Latina y África se mantienen bajo sistemas de pastoreo con mínima suplementación, y allí la adopción de TRA está creciendo como estrategia para mejorar la genética y la rentabilidad (Moraes et al., 2013; Macmillan

et al., 2020). Por tanto, comprender la relación causal entre trastornos metabólicos-carenciales, condición corporal y respuesta a las TRA no es solo un interés académico, sino una necesidad práctica para diseñar intervenciones nutricionales preconcepción que maximicen el retorno de la inversión en estas tecnologías.

Este artículo tiene como objetivo sintetizar la evidencia científica actual sobre la influencia de los trastornos metabólicos y carenciales, junto con la condición corporal, en la eficiencia de las tecnologías de reproducción asistida en bovinos de pastoreo. Se busca establecer un marco conceptual que permita interpretar los resultados variables de las TRA en sistemas extensivos y proponer bases para protocolos de manejo integrado nutricional-reproductivo, orientados a optimizar la fecundidad en poblaciones con restricción energética.

Materiales y métodos

Para esta revisión bibliográfica se adoptó un proceso metodológico estructurado y transparente, orientado a sintetizar la evidencia científica más reciente sobre la influencia de los trastornos metabólicos, carencias nutricionales y la condición corporal en la eficiencia de las tecnologías de reproducción asistida (TRA) en bovinas de pastoreo extensivo. La pregunta central fue: ¿Cómo afecta el estado metabólico y la condición corporal la respuesta reproductiva a la inseminación artificial sincronizada y la transferencia de embriones en hembras con baja suplementación?

La búsqueda se realizó entre enero del 2000 y marzo del 2025 en cuatro bases de datos: PubMed, Scopus, Web of Science y SciELO, para garantizar cobertura global e incluir literatura en español y portugués, así como estudios de campo en sistemas no intensivos. Se utilizaron combinaciones precisas de palabras clave en inglés y español relacionadas con el tema: embriones, concepción, transferencia, estrés, metabolismo y fertilidad.

Se incluyeron únicamente estudios originales o revisiones publicadas en revistas arbitradas que evaluaran al menos un indicador metabólico o de condición corporal en hembras bajo pastoreo y que reportaran resultados reproductivos asociados a TRA. Se excluyeron animales en confinamiento total, estudios sin medición objetiva de variables clave, tesis no publicadas y trabajos anteriores a 2000, salvo referencias fundacionales. Tras eliminar duplicados ($n = 1\,872$), se evaluaron 1 456 registros por título y resumen, con una concordancia interrevisores alta ($Kappa = 0,89$). De estos, 187 fueron leídos en texto completo, y finalmente se seleccionaron 83 estudios que cumplieran todos los criterios.

La información se aborda temáticamente en cuatro ejes: (1) trastornos metabólicos comunes en pastoreo; (2) condición corporal como predictor de fertilidad; (3) impacto en la fisiología ovárica y uterina durante TRA; y (4) eficacia real de las TRA en contextos de restricción energética. Se identifican patrones consistentes, contradicciones y, especialmente, críticas en regiones como América, África y Asia, donde los sistemas de pastoreo son dominantes pero la producción científica es escasa.

Como limitaciones, se reconoce la subrepresentación de estudios no indexados en idiomas locales y la heterogeneidad en la medición de la condición corporal y la definición de “baja suplementación”, lo cual impidió un metaanálisis cuantitativo. Por ello, esta revisión adopta un enfoque narrativo cualitativo, enfocado en interpretar mecanismos biológicos y proponer marcos prácticos para mejorar la eficiencia reproductiva en sistemas de bajos recursos.

Resultados y discusión

Efecto de los trastornos metabólicos y carenciales en la reproducción de la hembra bovina

El éxito reproductivo depende de la coordinación de una serie de eventos fisiológicos: la restauración del útero después del parto, la reanudación de la ciclicidad posparto, el desarrollo de un folículo y un ovocito viable, la ocurrencia de la ovulación, la fertilización, el adecuado desarrollo embrionario y fetal, y el parto. Estos eventos están relacionados con complejos mecanismos hormonales y metabólicos necesarios para un funcionamiento idóneo del sistema reproductivo (Meléndez y Bartolomé, 2017).

En el ganado bovino, los trastornos metabólicos y los estados carenciales tienen una gran importancia y han sido documentados tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo. Las hembras bovinas criadas en pastoreo y alimentadas con bajos niveles de concentrados presentan, temporalmente, trastornos reproductivos o incluso esterilidad completa (Pedroso y Gutiérrez, 2024). Estos problemas están condicionados por múltiples factores que pueden manifestarse durante las distintas fases del proceso reproductivo (Maquivar y Galina, 2010; Thatcher et al., 2010).

La mayoría de los investigadores afirman que, cuando las enfermedades infectocontagiosas están bajo control, los desequilibrios nutricionales y los estados carenciales adquieren importancia prioritaria en el rendimiento reproductivo. En sistemas intensivos, es raro encontrar hambre absoluta clásica; Sin embargo, la subalimentación crónica y deficiencias micronutricionales son comunes. En contraste, en sistemas extensivos o semiextensivos, se observan con mayor frecuencia una gama amplia de trastornos nutricionales —incluyendo deficiencias energéticas, proteicas y minerales— que se manifiestan como enfermedades metabólicas subclínicas o clínicas, alterando directamente la función ovárica, la calidad del ovocito y la eficacia de las biotecnologías reproductivas (Viamonte, 2010; Macmillan et al., 2020; Pires et al., 2022).

Alteraciones del estado ácido básico (EAB)

Las alteraciones del balance ácido-básico constituyen una de las perturbaciones metabólicas más comunes en la salud animal, no solo en rebaños de alta producción, sino también en aquellos de mediana y baja productividad. Estas disfunciones pueden surgir por excesos de componentes ácidos —como los cuerpos cetónicos o los ácidos orgánicos— o por desequilibrios en los sistemas tampón básicos, afectando directamente la homeostasis fisiológica. En los bovinos, el mantenimiento del equilibrio ácido-básico dentro de rangos fisiológicos se logra mediante un complejo sistema regulador que incluye mecanismos sanguíneos (buffering), la función respiratoria pulmonar —que controla la eliminación de CO₂— y la actividad renal, encargada de excretar protones y reabsorber bicarbonato. Adicionalmente, el rumen desempeña un papel clave al modular la absorción de ácidos volátiles y generar bicarbonato endógeno. Recientemente, ha surgido un interés creciente en caracterizar las variaciones del equilibrio ácido-básico (EAB) en el líquido folicular de hembras bovinas, dado su potencial impacto sobre la microambiente ovárico, la maduración del ovocito y la respuesta a las biotecnologías reproductivas (DeVries et al., 2009; Indrova et al., 2017).

En las vacas y novillas afectadas de acidosis metabólica se produce una disminución significativa de la eficiencia de los tratamientos de superovulación y sincronización del celo y en la tecnología de transferencia de embriones, los blastocistos obtenidos son de baja calidad lo cual decrece la tasa de la tasa de gestación en

las receptoras. La suplementación de sustancias reguladoras del (EAB), contribuyo a mejorar la fertilidad y eficiencia de la reproducción asistida (Tablas 1, 2 y 3).

Tabla 1. Efecto de los trastornos del estado ácido-base sobre la respuesta al tratamiento superovulatorio con FSH en vacas Holstein en clima tropical, según Pedroso (2003).

Grupo clínico	Número de animales	% de respuesta al tratamiento
Con acidosis metabólica	37	68,75 %*
Normales	15	100,00 %b
Total	52	76,90 %

Notas: Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($P > 0,05$). *Datos extraídos de Pedroso (2003).

Tabla 2. Eficacia comparativa de la tecnología de transferencia de embriones en vacas Holstein donantes y receptoras mestizas Holstein × Cebú tras la implementación de reguladores del balance ácido-base, según López Ruiz et al., (1996).

Indicadores	Grupo tratado	Grupo control
Número de donantes	269	330
Embriones totales obtenidos	1503	919
Embriones aptos	68	53
Media de embriones por donante	7,15 ^a	4,06 ^b
Media de embriones transferibles	4,8 ^a	2,1 ^b
Número de transferencias realizadas	479	215
Gestaciones (%)	45 ^a	33 ^b

Notas: Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas ($p < 0,05$). *Datos extraídos de López Ruiz et al., (1996).

Tabla 3. Mejoramiento de la eficiencia reproductiva de novillas Holstein × Cebú alimentadas con subproductos de la caña de azúcar mediante el suplemento en la dieta de sustancias reguladoras del estado ácido-básico según Pedroso (2003)

Grupos	N	Presentación de celo (%)	Concepción (%)	Gestación (%)
A	71	54,2 ^a	57,8 ^b	31,4 ^b
B	81	70,3 ^c	78,9 ^d	55,5 ^c
Subtotal	152	62,5 ^{ad}	70,5 ^{ab}	47,7 ^{ad}
C	66	36,4 ^c	62,5 ^b	22,7 ^{ca}

Notas: Letras distintas por columnas difieren entre sí $P < 0.05$. Tratamientos: A: magnesita 100g; B: bicarbonato de sodio 60g; C: control

Cetosis

La cetosis subclínica y clínica en vacas lecheras postparto constituye un trastorno metabólico crítico que compromete directamente la eficiencia de las técnicas de reproducción asistida (TRA), actuando como un factor limitante clave en la consecución de embarazos exitosos. A diferencia de lo que se supone combinado como un simple desequilibrio energético, la cetosis refleja una disfunción sistémica que altera la dinámica hormonal, la calidad ovocitaria, la función lútea y el microambiente endometrial —elementos fundamentales para la sincronización ovárica, la fecundación y la implantación embrionaria en contextos de IA, FIV o transferencia de embriones. El déficit energético severo que caracteriza a la cetosis suprime la pulsabilidad de la GnRH hipotalámica, reduciendo la secreción de LH y FSH, lo que retrasa la recuperación folicular y

favorece la persistencia de cuerpos lúteos funcionales anormales, generando ciclos anovulatorios o con ovulaciones tardías e inmaduras (López Ruiz et al., 1996).

Estas alteraciones endocrinas se traducen en una baja tasa de detección de celo, aumento de los anestros posparto y fallos en la sincronización de estro, afectando negativamente la eficacia de los protocolos de IA programados (TAI). Además, la cetosis está asociada a una disminución en la calidad del ovocito y del embrión, evidenciada por menor desarrollo embrionario in vitro, mayor índice de apoptosis celular y reducción de la expresión génica de marcadores de viabilidad embrionaria (como IFNT y STAT1). En paralelo, la inflamación sistémica inducida por la cetosis promueve un entorno uterino proinflamatorio, favoreciendo la persistencia de endometritis subclínica y alterando la expresión de receptores de progesterona y estrógenos en el endometrio, lo que compromete la receptividad embrionaria y reduce la tasa de establecimiento del embarazo incluso cuando la fecundación es exitosa. Estudios recientes demuestran que vacas con cetosis (β -hidroxibutirato ≥ 1.2 mmol/L) presentan tasas de concepción 25–40% más bajas tras IA programada, comparadas con animales normocetónicos, independientemente de la calidad seminal o del protocolo utilizado. Por tanto, la cetosis no es un mero epifenómeno del equilibrio energético negativo, sino un determinante metabólico central de la falla reproductiva en sistemas de reproducción asistida, cuya prevención y manejo deben integrarse como pilares fundamentales en los programas de manejo reproductivo moderno (Duffield et al., 2009).

Deficiencias de vitamina E, selenio y betacaroteno

Las vitaminas E y A (derivadas del betacaroteno), junto con el selenio, están íntimamente ligadas a los mecanismos antioxidantes del organismo y la modulación de la respuesta inmune (Suttle, 2021; Illek et al., 2021; Andělová et al., 2024). Estos nutrientes desempeñan un papel crítico en la protección del ovocito contra el daño oxidativo tanto in vivo como in vitro, influyendo directamente en su calidad, maduración y capacidad fecundativa (Pedroso y Gutiérrez, 2024). Varios estudios han demostrado que el estrés oxidativo compromete la eficacia de las tecnologías de reproducción asistida, reduciendo la viabilidad embrionaria, alterando la expresión génica relacionada con la implantación y disminuyendo las tasas de embarazo tras transferencia (Rani y Panneerselvam, 2001; Kadek et al., 2024; Aguilar y Rojas, 2015). En este contexto, múltiples investigaciones han documentado que la suplementación dietética con vitamina E, selenio y betacaroteno mejora la función inmune periparto, reduce la incidencia de enfermedades reproductivas y potencia la producción in vitro de embriones de mayor calidad (Moraes et al., 2013; Illek et al., 2023; Zambrano et al., 2025). En particular, Sales et al., (2008) reportaron un aumento significativo en el número total de embriones de calidad en vacas suplementadas con vitamina E previo al tratamiento superovulatorio; asimismo, Šmigoc et al., (2023) observaron una mejora estadísticamente significativa en la tasa de preñez de embriones transferidos provenientes de donantes suplementados con este antioxidante. Estos hallazgos sugieren que la suplementación de estos micronutrientes no solo actúa como soporte metabólico, sino como un factor determinante en la optimización de los resultados reproductivos en sistemas de reproducción asistida.

Con respecto a la vitamina A y el betacaroteno, se ha planteado que su suplementación contribuya a mejorar la capacidad antioxidante del organismo. En particular, cuando se administra previamente al tratamiento superovulatorio en vacas lecheras, se ha logrado un incremento significativo en el número de embriones de alta calidad (Sales et al., 2008; Rani y Panneerselvam, 2001; Kadek et al., 2024). Asimismo, se ha observado una evaluación positiva entre los niveles séricos de β -caroteno y el número de embriones transferibles

obtenidos tras la superovulación. Además, se evidencia una asociación significativa entre las concentraciones de betacaroteno en sangre el día de la inseminación y siete días posteriores al servicio, y tanto la concentración de progesterona ($r = 0,33$; $p < 0,05$) como la tasa de concepción ($r = 0,51$; $p < 0,01$). Estos hallazgos sugieren que el betacaroteno no solo actúa como precursor de la vitamina A, sino también como modulador funcional de la actividad lútea, mejorando la síntesis y secreción de progesterona por el cuerpo lúteo, lo que se traduce en una mayor tasa de preñez temprana (Aguilar y Rojas, 2015; Babar et al., 2025).

Deficiencias de minerales.

Actualmente se reconoce que más de 15 elementos minerales son esenciales en la nutrición de los rumiantes. Sin embargo, en regiones tropicales, el ganado bovino suele criarse bajo sistemas de pastoreo extensivo, en los cuales los forrajes nativos frecuentemente no satisfacen los requerimientos mínimos de minerales, especialmente de los microelementos. Como consecuencia, es común que se presente un desequilibrio nutricional mineral, incluso en rebaños con dietas aparentemente adecuadas. En este contexto, múltiples estudios han demostrado que dichos desequilibrios se asocian con un deterioro significativo de la función reproductiva y la salud general del animal. En particular, las investigaciones coinciden en identificar al calcio, fósforo, magnesio, cobre, zinc, manganeso y selenio como los minerales de mayor relevancia para la reproducción bovina (McDowell, 2005). Las deficiencias o excesos de estos elementos están vinculados a la ocurrencia de enfermedades infecciosas intra- y extra-genitales (Figueredo et al., 2017), anestro persistente, ciclos anovulatorios (Zambrano et al., 2025) y, recientemente, se ha evidenciado su impacto negativo sobre la eficiencia de las tecnologías de reproducción asistida. Estos efectos se atribuyen al papel fundamental que estos minerales desempeñan en tres aspectos clave: (i) la modulación de la respuesta inmune; (ii) el funcionamiento del eje hipotálamo-hipófisis-ovario (HHO); y (iii) el control del estrés oxidativo en procesos reproductivos, incluyendo la maduración ovocitaria, la función lútea y la receptividad endometrial.

Deficiencias y desbalance del aporte de proteína

El efecto de la alimentación proteica sobre la reproducción bovina ha sido objeto de múltiples estudios durante las últimas décadas, aunque aún persisten discrepancias en los hallazgos experimentales (Butler et al., 1996; Rhoads et al., 2006). Algunos autores han reportado que niveles elevados de proteína dietética ($>19\%$ de materia seca) ejercen un efecto negativo sobre la función reproductiva, atribuido principalmente a dos mecanismos: (1) un impacto tóxico directo sobre la calidad ovocitaria, la capacidad de fertilización de los gametos y la utilidad embrionaria; y (2) una alteración del equilibrio energético y su utilización, que repercute en el eje hipotálamo-hipófisis-ovario (HHO), modificando el control neuroendocrino que regula las funciones reproductivas (Arunvipas et al., 2007; Leroy et al., 2005; Law et al., 2009). Estos efectos se manifiestan en novillas como un retraso en la aparición de la pubertad, y en vacas lecheras como una disminución significativa en la tasa de preñez y un aumento en el número de días abiertos (Pedroso y Roller Gutiérrez, 2024). Es importante destacar que estos resultados dependen del tipo de proteína (degradabilidad ruminal), del nivel de energía total de la dieta y del estado fisiológico del animal, lo que explica en parte las variabilidades observadas en la literatura.

En la actualidad se enfatiza que los cambios bioquímicos observados en la sangre se reflejan también en el líquido folicular donde se desarrolla el ovocito y en el fluido uterino —sitio de la fertilización, implantación y desarrollo embrionario y fetal (De Bie, 2017). En este contexto, tanto la deficiencia como el exceso de

proteína dietética alteran la concentración sanguínea y folicular de amonio y urea, así como el pH del medio uterino, generando un entorno adverso que compromete la viabilidad y el desarrollo embrionario temprano (Kanyima et al., 2014; Ibtisham et al., 2018). Sin embargo, estudios previos realizados por Santos et al., (2008) sugieren que, aunque en modelos in vivo estas dietas se asocian con daño embrionario, en condiciones in vitro no se reproducen consistentemente los mismos efectos. Esta discrepancia sugiere que los ovocitos utilizados en sistemas de producción in vitro pueden ser menos susceptibles a los efectos tóxicos sistémicos derivados de la nutrición proteica, o que los factores ambientales del tracto reproductivo in vivo (como el estrés oxidativo, la inflamación endometrial o la toxicidad por amonio) son determinantes clave en la patogenia del daño embrionario. Por lo tanto, la evidencia experimental apoya la hipótesis de que el impacto negativo sobre el embrión no es directo sobre su estructura genética o citoplasmática, sino indirecto, mediado por las alteraciones del microambiente folicular y uterino. En consecuencia, resulta prioritario orientar futuras investigaciones hacia la caracterización de estos microambientes reproductivos bajo distintos regímenes proteicos, con el fin de identificar biomarcadores predictivos de calidad embrionaria y diseñar estrategias nutricionales que preserven la funcionalidad del entorno reproductivo.

Deficiencia y desbalance del aporte de energía en la dieta

El efecto del desequilibrio energético —ya sea por deficiencia o exceso— en los fenómenos reproductivos ha sido ampliamente estudiado, particularmente durante la fase prepuberal en novillas (Beam y Butler, 1997) y en el período de transición al inicio de la lactancia en vacas lecheras (Thatcher et al., 2010; Al Ibrahim et al., 2010; Vargas et al., 2021; Gilbert, 2019). En estos estados de equilibrio energético negativo (BEN), se observan alteraciones endocrinas y metabólicas profundas que interfieren directamente con el eje hipotálamo-hipófisis-ovario (HHO), modificando la pulsabilidad de la GnRH, reduciendo la secreción de LH y FSH, y comprometiendo la maduración folicular y la ovulación. Paralelamente, se produce una modulación inmune supresiva, que incrementa la susceptibilidad a enfermedades infecciosas tanto intra como extragenitales, como metritis, endometritis y mastitis (Galvão et al., 2010; Sordillo y Raphael, 2013; Talukder et al., 2017). Estas disfunciones se manifiestan clínicamente como retraso en la involución uterina, mayor incidencia de infecciones del tracto reproductivo y de la glándula mamaria, anestro posparto, alta mortalidad embrionaria temprana (Shahzad et al., 2024) y, en consecuencia, una marcada disminución en la eficacia de las técnicas de reproducción asistida, incluyendo inseminación artificial programada y transferencia de embriones (Desta, 2024).

Perfil metabólico

Los perfiles metabólicos constituyen métodos complementarios de diagnóstico orientados a evaluar el equilibrio entre el ingreso, la utilización y la metabolización de nutrientes en los distintos tejidos del animal, permitiendo identificar alteraciones metabólicas y carenciales que comprometen la productividad y la salud reproductiva del ganado (Viera, 2011; Puppel y Kuczyńska, 2016). Actualmente, se reconocen dos enfoques principales: un perfil simplificado, basado en muestras de sangre y orina, y un perfil ampliado, que incorpora análisis de leche, líquido ruminal, y tejidos hepático y óseo (Walter et al., 2022; Mora-Luna et al., 2023; Toscano et al., 2023). Estas muestras se emplean para determinar el perfil mineral, el estado ácido-base, los niveles de cuerpos cetónicos y los indicadores del metabolismo proteico y energético. Además, se evalúan parámetros relacionados con el sistema oxidante-antioxidante, la respuesta inmune, el cuadro hematológico

y la función hepática. En contextos reproductivos avanzados, también se analiza el contenido del líquido folicular ovárico como biomarcador del microambiente folicular (De Bie, 2017; Pedroso, 2003).

Para garantizar la representatividad y validez estadística de los perfiles metabólicos, se recomienda incluir un mínimo del 10% del total de animales en cada categoría, con un número no inferior a cinco individuos por grupo. Las muestras deben agruparse según el estado fisiológico (novillas prepuberales, vacas en gestación [3, 5 y 7 meses], hembras en período posparto temprano [30–60 días postparto]), nivel de producción (bajo, medio, alto) y estado clínico (sanas vs. afectadas por enfermedades metabólicas o reproductivas típicas, como cetosis, hipocalcemia, endometritis o anestro persistente). Esta estrategia de muestreo permite una caracterización precisa del estado nutricional-metabólico del hato y facilita la interpretación clínica de los resultados en relación con la eficiencia reproductiva asistida.

La experiencia adquirida después de varias décadas empleando este sistema de diagnóstico en la ganadería vacuna de doble propósito criadas en condiciones de pastoreo en clima tropical, se comprobó, que las reacciones sexuales son individuales y diferentes factores pueden provocar uniforme reacción reproductiva en un caso; y en el otro, un solo factor puede inducir diferentes reacciones. Este hecho fue demostrado en un estudio realizado en rebaños de ganado bovino bajo sistema de producción de pastoreo en el trópico húmedo. De acuerdo con estos datos es evidente, que una misma carencia o desbalance nutricional se asocia a varios síntomas de subfertilidad e infertilidad (Tabla 4):

Tabla 4. Relación entre los trastornos metabólicos y carenciales con diversos disturbios de la fertilidad en la hembra bovina de clima subtropical según Pedroso, (2003).

Trastornos metabólicos y carenciales	Frecuencia (%)	Retorno al servicio	Trastornos funcionales	Abortos / crías muertas	Infecciones uterinas
Hipofosforemia	8	x	x	x	
Hipomagnesemia	8	x	x	x	
Deficiencia de Cu	45	x	x	x	
Deficiencia de Zn	13	x	x	x	
Deficiencia de β -Caroteno	9	x	x	x	
Acidosis metabólica	17	x	x	x	x

Relación entre la condición corporal y la eficiencia de las tecnologías de reproducción asistida en bovinos: implicaciones para la heredabilidad

En todos los sistemas de producción bovina, los animales experimentan períodos de restricción alimentaria o reducción del consumo, ya sean breves o prolongados. Estos estados generan, en primer lugar, pérdida de peso corporal y, en segundo lugar, movilización de reservas energéticas, cuyas consecuencias se reflejan en cambios del Estado de Condición Corporal (ECC), particularmente durante la lactancia temprana y la gestación. El ECC constituye un indicador práctico, no invasivo y validado para evaluar el estado nutricional del animal, siendo ampliamente utilizado tanto en la gestión diaria como en estudios de investigación.

Diversas metodologías para la evaluación del ECC se describen en la literatura, todas basadas en la observación visual y la palpación de regiones anatómicas específicas: exposición de las costillas, inserción de la cola, demarcación de las vértebras dorsales y lumbares, hundimiento del hueso iliaco, convexidad de las nalgas y forma de los cuartos posteriores. Para cuantificar estos cambios, se emplean escalas de puntuación

que varían entre 1 y 5 o 1 y 10 puntos (Macdonald y Roche, 2004). La escala de 1 a 5 puntos es la más utilizada en la práctica ganadera y en la investigación científica (Pedroso y Roller Gutiérrez, 2024). Es importante destacar que, independientemente de la escala empleada, los valores bajos de ECC reflejan emaciación, mientras que los valores altos indican obesidad.

Las variaciones en el ECC presentan correlaciones estrechas con las reservas corporales de grasa, los niveles séricos de metabolitos energéticos (como β -hidroxibutirato y glucosa), el consumo voluntario de alimento (Wathes et al., 2003; Torrez et al., 2020) y parámetros endocrinos (por ejemplo, leptina, insulina e IGF-1) (García-Gavidia, 1998; Reist et al., 2002), patrones similares a los observados durante desequilibrios energéticos o proteicos en vacas lecheras (Desta, 2024). Por ello, el ECC se ha asociado consistentemente con Múltiples variables productivas y sanitarias: producción láctea (López et al., 1996), incidencia de enfermedades metabólicas (Roche y Berry, 2006), salud general (Berry et al., 2007; Akbar et al., 2015), fertilidad (Lacerda et al., 2018) y eficiencia de las tecnologías de reproducción asistida (Peña et al., 2007; Leroy et al., 2011; López et al., 1996).

Además, el ECC exhibe una heredabilidad moderada ($h^2 \approx 0.20-0.40$) y fuertes correlaciones genéticas con la producción de leche, el comportamiento reproductivo (Dechow et al., 2004; Zotto et al., 2007) y ciertos rasgos de conformación corporal (Kadarmideen y Wegmann, 2003). En consecuencia, se ha propuesto su uso como rasgo indirecto en programas de selección genética para mejorar simultáneamente la eficiencia reproductiva, la longevidad y la resistencia al estrés metabólico en hatos lecheros (Moraes et al., 2013; Sheehy et al., 2017).

Relación entre el estado de la condición corporal y el desempeño reproductivo

De acuerdo con evidencia experimental, vacas y novillas con un Estado de Condición Corporal (ECC) bajo (puntuación de 2–3 en escala de 1 a 5) bajo condiciones de consumo restringido presentan frecuentemente repetición del servicio y persistencia de anestro (Figuras 1 y 2). Este fenómeno es particularmente prevalente en novillas incorporadas al rebaño reproductivo y en vacas que calvan y son servidas durante épocas de baja disponibilidad forrajera en sistemas tropicales (Zambrano et al., 2025). Cuando estas pérdidas de masa corporal ocurren durante el período de transición, se asocian con un alargamiento significativo del intervalo parto-primer celo, mayor susceptibilidad a infecciones intra y extragenitales (Baruselli et al., 2015), y reducción de la fertilidad (Banos et al., 2007).

Estudios longitudinales y metaanálisis han demostrado que el ECC medido en los días previos al parto permite predecir con una precisión superior al 60% el desempeño reproductivo posparto, incluyendo tasa de concepción e intervalo parto-concepción (Berry et al., 2002; McCarthy et al., 2007). Esta capacidad predictiva se fundamenta en la estrecha relación entre el equilibrio energético, la movilización de reservas lipídicas y la regulación neuroendocrina del eje hipotálamo-hipófisis-ovario (HHO). Por tanto, el ECC no solo es un indicador de estado nutricional, sino una herramienta práctica y económica para guiar intervenciones alimentarias dirigidas a optimizar la eficiencia reproductiva en sistemas intensivos y extensivos.

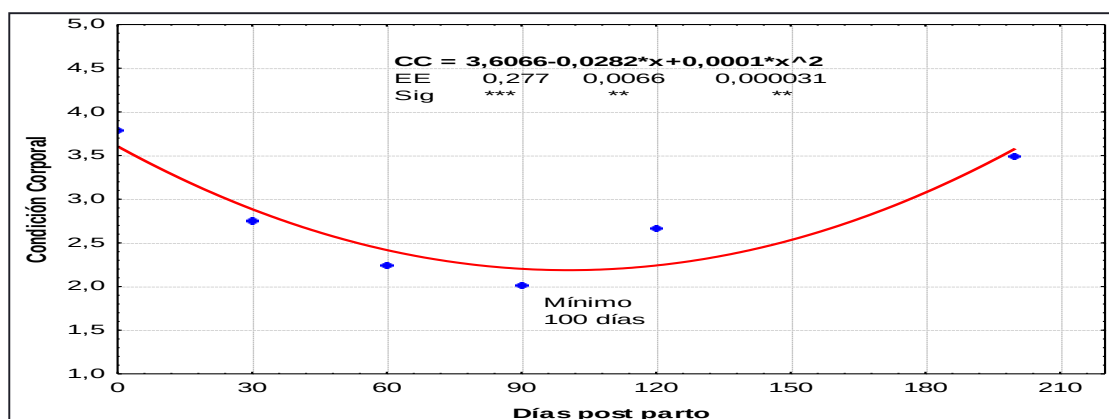


Figura.1. Inicio de la actividad ovárica posparto en función de la condición corporal en vacas Criolla cubana.
Fuente: (Viamonte, 2010)

Efecto del estado de la condición corporal y la respuesta de los programas de IATF

En estudios recientes se ha demostrado que el Estado de Condición Corporal (ECC) influye significativamente en la eficacia de los protocolos de inducción y sincronización del celo en vacas lecheras. Aquellas con un ECC inferior a 2.5 puntos (escala de 1 a 5) al momento de la implementación de los protocolos de inseminación artificial en tiempo fijo (IATF) presentan una tasa de preñez reducida en comparación con animales con $ECC \geq 2.5$ (Leroy et al., 2011; De Bie, 2017). Esta disminución en la respuesta reproductiva se atribuye a una mayor prevalencia de anestro previo al tratamiento, junto con alteraciones foliculares y lúteas: tamaño reducido del folículo dominante, menor volumen del cuerpo lúteo y consecuente disminución en la síntesis y secreción de progesterona (Duffield et al., 2009). Además, se ha reportado una disminución en la calidad ovocitaria, viabilidad embrionaria y capacidad fecundativa de los gametos (Leroy et al., 2011; De Bie, 2017). Estos cambios se reflejan en la Figura 2.

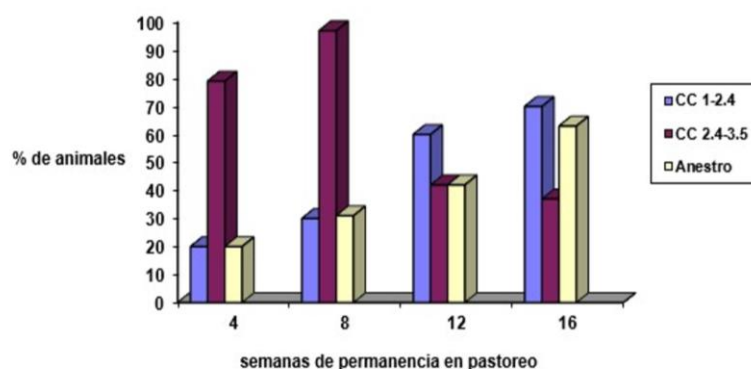


Figura 2. Estado de la CC y frecuencia de anestro durante el periodo de poca disponibilidad de los pastos en rebaños bovinos en IA y programas de inducción del estro.
Fuente: (Leroy et al., 2011; De Bie, 2017)

En conjunto, la evidencia experimental respalda consistentemente que las hembras bovinas con un ECC ≥ 2.5 puntos en la escala de 1 a 5 tienen una probabilidad significativamente mayor de concebir tras IATF que aquellas con ECC < 2.5 (Tabla 5). Por tanto, el ECC no solo es un indicador nutricional, sino un predictor clave de éxito reproductivo en programas de reproducción asistida, y su evaluación previa al tratamiento debe integrarse como estándar en los protocolos de manejo reproductivo.

Tabla 5. Efecto del estado de la condición corporal en la respuesta al tratamiento de sincronización del celo mediante protocolo convencional de Progesterona y Gonadotropina Coriónica de Yegua Gestante (eCG) en novillas 5/8 Holstein $\times$ 3/8 Brahman en el trópico húmedo, según Pedroso, (2003).

Indicador	Condición corporal baja	Condición corporal media	Condición corporal alta
Número de novillas	191	403	594
Novillas cíclicas antes del tratamiento (%)	42,8 ^a	60,2 ^b	58,1
Novillas en celo posterior al tratamiento (%)	87,0	79,0	62,1
Novillas que ovularon posterior al tratamiento (%)	27,0 ^a	72,4 ^b	80,4
Concepción (%)	8,3 ^a	41,3 ^b	30,4

Notas: Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Puntuación de condición corporal, heredabilidad y su impacto en la eficiencia de la producción y transferencia de embriones in vitro en ganado

En estudios previos se ha demostrado que la capacidad de un individuo para movilizar o almacenar reservas energéticas tiene un origen genético. En la actualidad, se ha confirmado que la regulación del equilibrio energético corporal —es decir, la habilidad para conservar y movilizar reservas de grasa— está bajo control genético (Tabla 6), lo que explica la marcada variabilidad individual observada al inicio de la lactancia (Berry et al., 2002). Por ello, se propone incluir el Estado de Condición Corporal (ECC) como un índice fenotípico útil para la selección genética de animales con mayor resiliencia metabólica y capacidad de adaptación a condiciones adversas, como el estrés nutricional o el equilibrio energético negativo (McCarthy et al., 2007). En este contexto, el uso de tecnologías objetivas como la ecografía Doppler o la ecografía B-mode para cuantificar el grosor del tejido adiposo subcutáneo permite reducir la subjetividad inherente a las escalas manuales de evaluación del ECC, mejorando así la precisión y reproducibilidad de los programas de selección.

Tabla 6. Estimados de heredabilidad de rasgos reproductivos en distintas razas vacunas, según Veliz et al., (2004)

Grupo racial	IPP	IPPS	IPC	SxG
Cebú	0,07		0,072	0,036
Doble propósito	0,100			
Asturiana	0,120			
Holstein	0,018	0,022		0,027
Cebú	0,060	0,050	0,060	0,010
Siboney	0,080			0,010
Nelore	0,070			
Friesian			0,039	
Santa Gertrudis	0,10		0,10	0,06

Santa Gertrudis	0,08	0,07	0,07	0,01
------------------------	------	------	------	------

Notas: IPP: Intervalo entre partos. IPPS: Intervalo parto–primer servicio. IPC: Intervalo parto–concepción. SxG: Servicio por gestación.

El impacto del Estado de Condición Corporal (ECC) en la eficiencia de la producción in vitro de embriones (IVP) y su transferencia en bovinos ha sido ampliamente estudiado (Izadyar, 1999; Snijders et al., 2000). Los resultados indican que el ECC tanto en donantes como en receptoras influye significativamente en la calidad ovocitaria, el desarrollo embrionario in vitro, la tasa de implantación y la supervivencia post-transferencia. Específicamente, los ovocitos recolectados de vacas con ECC bajo (<3 puntos) muestran una reducida capacidad de maduración, fecundación y desarrollo hasta etapas de blastocisto en cultivo in vitro (Izadyar, 1999; Snijders et al., 2000). Estas alteraciones se asocian con deficiencias metabólicas y endocrinas relacionadas con el equilibrio energético negativo, que comprometen la síntesis de proteínas clave y la regulación génica necesaria para el desarrollo embrionario temprano.

Sin embargo, estudios recientes han demostrado que la suplementación de los medios de cultivo con hormona del crecimiento (GH) o factores de crecimiento tipo insulina (IGF-1) puede mitigar parcialmente estos efectos, mejorando la tasa de maduración nuclear, la calidad del blastocisto y la viabilidad embrionaria en ovocitos provenientes de animales con baja condición corporal (Blondin, 2017; Bó y Mapletoft, 2018). Estos hallazgos proporcionan evidencia directa de que las reservas corporales limitadas —reflejadas en un ECC < 3— afectan intrínsecamente la competencia ovocitaria y embrionaria, independientemente del protocolo de cultivo utilizado. Además, se ha establecido una valoración positiva entre el ECC de las hembras donantes y la cantidad y calidad de embriones producidos in vitro, respaldada por datos cuantitativos en Tablas 7 y 8. Por tanto, el ECC no solo es un indicador nutricional, sino un factor predictivo crítico de la eficacia de los programas de biotecnología reproductiva, cuya evaluación previa debe integrarse como estándar en la selección de donantes y receptores para optimizar los rendimientos de IVP y transferencia embrionaria (Kasimanickam et al., 2020).

Tabla 7. Efecto del estado de la condición corporal sobre el desarrollo de embriones producidos in vitro en vacas mestizas Holstein × Cebú bajo condiciones climáticas de Cuba, según López et al., (1996)

Condición corporal	Número de ovocitos	% de ovocitos divididos (n)	Número de embriones
1	108	49,1 % (53) ^a	9,4 ^a
2	215	45,6 % (98) ^b	25,5 ^b
3	90	61,1 % (55) ^c	34,5 ^c

Notas: Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Tabla 8. Efecto del estado de la condición corporal en la división y desarrollo a blastocisto de ovocitos recolectados en vacas lecheras posterior al sacrificio, según Snijders et al., (2000)

Parámetro	Condición corporal 1.5–2.5	Condición corporal 3.3–4.0
N	20	20
Número de ovocitos recolectados	7,07 ± 1,80	8,5 ± 1,48
% de ovocitos divididos	61,9 ^a	75,7 ^b
Número de blastocistos	0,14 ± 0,37 ^a	0,78 ± 0,30 ^b

% de blastocistos obtenidos de ovocitos fertilizados y cultivados in vitro	3,0 ^a	9,9 ^b
% de blastocistos obtenidos de ovocitos fertilizados y divididos	4,8	13,0

Notas: Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Estos resultados experimentales sugieren, que la evaluación previa del estado metabólico, carencial y la condición corporal son indicadores fundamentales para la selección de las hembras bovinas utilizadas en los programas de reproducción asistida. La implementación conjunta de estos sistemas de diagnóstico puede contribuir a la mejora de la eficiencia del desempeño reproductivo e implementación de estas nuevas tecnologías.

Mecanismo hormonal, celular y molecular mediante los cuales el estado de la condición corporal afecta la reproducción y ejerce su impacto en la eficacia de las biotecnologías de la reproducción.

Los primeros estudios orientados a desentrañar los mecanismos fisiológicos mediante los cuales el Estado de Condición Corporal (ECC) influye en la reproducción bovina se centraron en su rol como indicador del estado de reservas energéticas corporales, y en su impacto sobre el eje hipotálamo-hipófisis-ovario (HHO) y el eje hipotálamo-hipófisis-suprarrenal (HHS), así como en su repercusión sobre el metabolismo intermediario. Estos cambios fisiopatológicos son análogos a los observados durante déficits energéticos crónicos o desequilibrios nutricionales, y reflejan los procesos de homeostasis y homeorresis que el organismo activa para priorizar funciones vitales sobre la reproducción —fenómenos que comprometen directamente la eficiencia reproductiva y la respuesta a las tecnologías de reproducción asistida.

La asociación entre ECC y función reproductiva está modulada por la interacción entre fenotipo y genética (Friggens et al., 2010). Durante el período periparto y la transición temprana a la lactancia —cuando el balance energético negativo es más pronunciado—, las vacaciones movilizan intensivamente las reservas de grasa corporal, lo que se traduce en una disminución marcada del ECC. Esta respuesta adaptativa induce una supresión de la pulsabilidad del GnRH hipotalámico, reduciendo la secreción de LH y, consecuentemente, la estimulación folicular. Como resultado, se observa una disminución en la producción de estrógeno por los folículos dominantes y de progesterona por el cuerpo lúteo, lo que acelera la atresia folicular y reduce la tasa de crecimiento folicular (Bunker et al., 1998).

En paralelo, la movilización lipídica activa cambios metabólicos clave: aumentan los niveles plasmáticos de hormona del crecimiento (GH) y ácidos grasos libres (AGL), mientras que disminuyen significativamente la glucosa, la insulina, el factor de crecimiento similar a la insulina 1 (IGF-1), la leptina y ciertos aminoácidos esenciales (Roche et al., 2009). Este perfil metabólico favorece la generación de especies reactivas de oxígeno (ERO) y radicales libres (ROS), cuya acumulación, en función de la severidad y duración del déficit energético, puede inducir estrés oxidativo (EO). El EO, a su vez, provoca daño oxidativo en células ovocitarias, embrionarias y endometriales, promoviendo apoptosis, alteraciones en la expresión génica relacionadas con la calidad ovocitaria y la receptividad uterina, y disrupciones en la señalización celular necesaria para la fecundación, la segmentación embrionaria y la implantación (López-Gatius et al., 2002; Santos et al., 2004).

Por tanto, el ECC actúa como un integrador fenotípico que refleja el estado metabólico y redox del animal, vinculando de manera directa la nutrición, el estrés fisiológico y la capacidad reproductiva. Su evaluación permite anticipar riesgos de falla en la reproducción natural y asistida, y justificar intervenciones nutricionales y farmacológicas dirigidas a restaurar el equilibrio energético y reducir el estrés oxidativo en periodos críticos.

En este sentido, es fundamental destacar que las modificaciones en los marcadores bioquímicos sanguíneos —incluyendo cuerpos cetónicos, ácidos grasos libres, glucosa, insulina y leptina— se reflejan directamente en el líquido folicular y el fluido uterino, donde alteran el microambiente necesario para el crecimiento folicular, la maduración ovocitaria y la receptividad endometrial. Estas disfunciones están asociadas con trastornos del ciclo estral, incluyendo anestro persistente, ciclos anovulatorios y reducción de la calidad embrionaria, lo que compromete la supervivencia, implantación y mantenimiento de la preñez (López-Gatius et al., 2002; Santos et al., 2004). Asimismo, dichas alteraciones afectan negativamente la eficacia de las técnicas de inseminación artificial en tiempo fijo (IATF) y la producción in vitro de embriones (De Bie, 2017).

A pesar de esta evidencia, aún no se ha investigado sistemáticamente el efecto del Estado de Condición Corporal (ECC) sobre la capacidad de criopreservación de embriones bovinos. Sin embargo, dado que el deterioro del ECC se asocia con daños celulares y moleculares —como estrés oxidativo, alteraciones en la expresión génica y disrupción de la homeostasis osmótica— es plausible suponer que estos factores reducen la tolerancia embrionaria al proceso de congelación-descongelación, impactando directamente en la viabilidad post-criopreservación. Por tanto, resulta prioritario incluir este tema en futuros programas de investigación, con el fin de establecer protocolos de selección de donantes basados en ECC y optimizar las tasas de éxito en programas de transferencia embrionaria crioconservada.

A la luz de estos hallazgos, es evidente que el control preventivo de los trastornos metabólicos y carenciales, junto con el mantenimiento adecuado del ECC durante etapas críticas (periparto, transición, lactancia temprana), constituye una estrategia clave para mejorar la eficiencia reproductiva en sistemas de reproducción asistida. Más allá de su valor como indicador nutricional, el ECC demuestra potencial como rasgo fenotípico de selección genética, capaz de anticipar respuesta reproductiva, resistencia metabólica y calidad embrionaria.

En este contexto, la evaluación del ECC —mediante escala visual-manual o ecografía modo B— y el análisis de perfiles metabólicos sanguíneos deben integrarse como herramientas complementarias en la práctica veterinaria, previo a la implementación de programas de mejora genética, multiplicación y conservación de animales de alto potencial genético. Esta aproximación integrada no solo optimiza la eficiencia reproductiva, sino que también promueve la sostenibilidad y rentabilidad de los sistemas ganaderos modernos.

Conclusiones

Los trastornos metabólicos y carenciales nutricionales —especialmente el balance energético negativo (BEN), la cetosis subclínica, la hipocalcemia posparto y las deficiencias de selenio, zinc, fósforo, magnesio y antioxidantes— son determinantes críticos de la eficiencia reproductiva en bovinos de pastoreo extensivo, donde la suplementación es limitada y los sistemas productivos dependen fuertemente de la calidad del forraje. Esta revisión demuestra, mediante evidencia experimental consolidada, que estos factores no actúan de manera aislada, sino como un sistema integrado que compromete la función ovárica, la calidad ovocitaria, la receptividad endometrial y la viabilidad embrionaria, afectando directamente los resultados de las tecnologías

de reproducción asistida (TRA) como la inseminación artificial en tiempo fijo (IATF) y la transferencia de embriones (TE).

El Estado de Condición Corporal (ECC), medido mediante escala visual o ecografía B-mode, emerge como el indicador fenotípico más robusto y predictivo de éxito reproductivo en estos sistemas, superando en poder predictivo a los protocolos hormonales de sincronización. Vacas con ECC < 2.5 presentan tasas de preñez hasta un 40% inferiores a animales con ECC ≥ 3.0 , incluso cuando se aplican protocolos óptimos. Este efecto se explica por alteraciones neuroendocrinas (supresión de GnRH/LH, disminución de IGF-1 y resistencia a la leptina), disfunción folicular, estrés oxidativo sistémico, inflamación crónica y alteraciones epigenéticas que reducen la competencia ovocitaria y embrionaria.

Además, se evidencia que las deficiencias de micronutrientes modulan la respuesta reproductiva mediante mecanismos específicos: la baja disponibilidad de selenio y zinc aumenta la susceptibilidad al daño oxidativo en ovocitos y embriones; la deficiencia de fósforo reduce la expresión de receptores de progesterona en el endometrio; y la cetosis eleva los cuerpos cetónicos, que atenúan la respuesta a GnRH y comprometen la síntesis de estradiol. Estos efectos se reflejan en el líquido folicular y el fluido uterino, creando un microambiente no viable para la fecundación y la implantación.

Por tanto, la implementación de TRA en sistemas de pastoreo sin intervención nutricional previa es económicamente insostenible y científicamente injustificada. La evaluación del ECC y el perfil metabólico sérico (β -HB, glucosa, IGF-1, leptina, ERO/antioxidantes) deben convertirse en protocolos obligatorios de tamizaje pre-reproductivo, no como complementos, sino como condiciones previas indispensables para la aplicación de cualquier tecnología de reproducción asistida. Asimismo, la heredabilidad moderada del ECC y su fuerte correlación genética con producción, salud y fertilidad respaldan su inclusión como rasgo indirecto de selección genética, permitiendo la identificación temprana de hembras con mayor resiliencia metabólica y potencial reproductivo estable bajo estrés nutricional.

Referencias

- Aguilar, E., & Rojas, A. (2015). Variaciones de beta caroteno en sangre de vacas lecheras durante el período post parto. *Nutrición Animal Tropical*, 9(2), 91-104. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/nutrianimal/article/view/21606>
- Akbar, H., Grala, T. M., Vailati, R. M., Cardoso, F. C., Verkerk, G., & McGowan, J. (2015). Body condition score at calving affects systemic and hepatic transcriptome indicators of inflammation and nutrient metabolism in grazing dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 98(1), 1019-1032. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8584>
- Al Ibrahim, R. M., Kelly, A. K., O'Grady, L., Gath, V. P., McCarney, C., & Mulligan, F. J. (2010). The effect of body condition score at calving and supplementation with *Saccharomyces cerevisiae* on milk production, metabolic status, and rumen fermentation of dairy cows in early lactation. *Journal of Dairy Science*, 93(11), 5318–5328. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3201>
- Andělová, J., Blažejak-Grabowská, J., Staffa, A., Kadek, R., Kumprechtová, D., & Illek, J. (2024). Selenium status of beef cattle in the Czech Republic. *Acta Veterinaria Brno*, 93(2), 123-128. <https://doi.org/10.2754/avb202493020123>

- Arunvipas, P., Vanleeuwen, J. A., Dohoo, I. R., Leger, E. R., Keefe, G. P., Burton, A. S., & Lissemore, K. D. (2007). Milk urea-nitrogen negatively affected first-service breeding success in commercial dairy cows in Prince Edward Island, Canada. *Preventive Veterinary Medicine*, 82(1-2), 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2007.05.005>
- Babar, M., Buzdar, J. A., & Zaheer, A. (2025). Carotenoids as a nutraceutical and health-promoting dietary supplement for human and animals: an updated review. *Traditional Medicine Research*, 10(3), 14. <http://dx.doi.org/10.53388/TMR20240831001>
- Banos, G. S., Brotherstone, S., & Coffey, M. P. (2007). Prenatal maternal effect on body condition score, female fertility, and milk yield of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 90(7), 3490-3499. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-809>
- Baruselli, P. S., Vieira, L. M., Sá Filho, M. F., & Marques, M. O. (2015). Resynchronization programs in beef and dairy cattle. En M. Caccia & G. A. Bó (Eds.), *Proceedings of the XI Symposium on Animal Reproduction* (pp. 235-256). Institute of Animal Reproduction Cordoba (IRAC). <https://iracbiogen.com/wp-content/uploads/2021/06/RESUMEN-11-Simposio-Internacional-de-Reproduccion-Animal-2015.pdf>
- Beam, S. W., & Butler, W. R. (1997). Energy balance and ovarian follicle development prior to the first ovulation postpartum in dairy cows receiving three levels of dietary fat. *Biology of Reproduction*, 56(1), 133-142. <https://doi.org/10.1095/biolreprod56.1.133>
- Berry, D. P., Buckley, F., O'Callaghan, P., Evans, R., Rath, M., & Veerkamp, R. F. (2002). Genetic parameters for level and change of body condition score and body weight in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 85(8), 2030-2039. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74280-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74280-X)
- Berry, D. P., Lee, L. M., Macdonald, K. A., & Roche, J. R. (2007). Body condition score and body weight effect on dystocia and stillbirths and consequent effects on postcalving performance. *Journal of Dairy Science*, 90(9), 4201-4211. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0023>
- Blondin, P. (2017). Logistics of large scale commercial IVF embryo production. *Reproduction, Fertility and Development*, 29(1), 32-36. <https://doi.org/10.1071/RD16317>
- Bó, G. A., & Mapletoft, R. (2018). Embryo transfer technology in cattle. En C. Niemann & H. Wrenzycki (Eds.), *Animal biotechnology* (pp. 107-133). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92327-7>
- Bunker, J. M., Hampton, J. H., Staples, C. R., & Thatcher, W. W. (1998). Body condition influence maintenance of persistent first wave dominant follicle in dairy cattle. *Theriogenology*, 49(4), 751-760. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(98\)00024-7](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(98)00024-7)
- Butler, W. R., Calaman, J. J., & Beam, S. W. (1996). Plasma and milk urea nitrogen in relation to pregnancy rate in lactating dairy cows. *Journal of Animal Science*, 74(4), 858-865. <https://doi.org/10.2527/1996.744858x>
- De Bie, E. (2017). *The follicular micro-environment of the oocyte in metabolically compromised dairy cows: impact assessment as a basic for oocyte rescue* [Tesis doctoral, Universiteit Antwerpen]. Universiteit Antwerpen. <https://repository.uantwerpen.be/docman/irua/962073/141807.pdf>
- Dechow, C. D., Rogers, G. W., Klei, L., & Lawlor, T. J. (2004). Heritability and correlation for body condition score and dairy form within and across lactation and age. *Journal of Dairy Science*, 87(3), 717-728. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73215-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73215-4)

- Desta, A. G. (2024). The effect of crude protein and energy on conception of dairy cow: a review. *Discover Animals*, 1(29). <https://doi.org/10.1007/s44338-024-00030-1>
- DeVries, T. J., Beauchemin, K. A., Dohme, F., & Schwartzkopf-Genswein, K. S. (2009). Repeated ruminal acidosis challenges in lactating dairy cows at high and low risk for developing acidosis: Feeding, ruminating, and lying behavior. *Journal of Dairy Science*, 92(10), 5067–5078. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2102>
- Duffield, T. F., Lissemore, K. D., McBride, B. W., & Leslie, K. E. (2009). Impact of hyperketonemia in early lactation dairy cows on health and production. *Journal of Dairy Science*, 92(2), 571–580. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1507>
- Figueredo, Y., Gonzáles, N., Martínez, J., Molienda, Á., García, I., García, R., Roller, F., & Pedrosa, R. (2017). Niveles de inmunoglobulinas, incidencia de mastitis y fertilidad de vacas lecheras hipocuprémicas suplementadas con cobre. *La Técnica*, (18), 43-48. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6087652>
- Friggens, N. C., Disenhaus, N., & Petit, H. V. (2010). Nutritional sub-fertility in the dairy cow: towards improved reproductive management through a better biological understanding. *Animal*, 4(7), 1197–1213. <https://doi.org/10.1017/S1751731109991601>
- Galvão, K. N., Flaminio, M., Brittin, S. B., Sper, R., Fraga, M., Caixeta, L., Ricci, A., Guard, C. L., Butler, W. R., & Gilbert, R. O. (2010). Association between uterine disease and indicators of neutrophil and systemic energy status in lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 93(7), 2926-2937. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2551>
- García-Gavidia, A. N. (1998). *Use Bovine somatotropina (bST) in manegement of growing heifers and transition cows to improvement growth rates and milk production* [Tesis doctoral, University of Florida].
- Gilbert, R. M. (2019). Symposium review: Mechanisms of disruption of fertility by infectious diseases of the reproductive tract. *Journal of Dairy Science*, 102(4), 1-12. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15602>
- Illek, J., Dresler S., Šoch, M., Kernerová, N., Líbalová, K., Zevlová, E., & Havrdová, N. (2023). Influence of organic zinc on lactation performance and somatic cell count in dairy cows. *Acta Veterinaria Brno*, 92(3), 233-241. <https://doi.org/10.2754/avb202392030233>
- Illek, J., Kumprechtová, D., Tomchuk, V., Gryshchenko, V., & Kalinin, I. V. (2021). The effect of two different doses of selenium yeast and sodium selenite on selenium level in blood, colostrum, milk and metabolic. *Ukrainian Journal of Veterinary Sciences*, 12(3). <https://veterinaryscience.com.ua/en/journals/tom-12-3-2021/vpliv-dvokh-riznikh-doz-seleno-mistkikh-drizhdzhiv-ta-selenitu-natriyu-na-riven-selenu-v-krovi-molozivi-i-molotsi-ta-metaloprofil-u-molochnikh-koriv>
- Indrova, R., Dolezel, J., Novakova, A., Pechova, M., & Zavadilova, S. C. (2017). Impact of acute metabolic acidosis on the acid-base balance in follicular fluid and blood in dairy cattle. *Theriogenology*, 89(1), 41-46. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.09.053>
- Izadyar, F. (1999). *Regulation of bovine oocyte maturation: the role of activin and growth hormone* [Tesis doctoral]. Holland.
- Ibtisham, F., Nawab, A., Li, G., Lilong An, M., & Naseer, G. (2018). Nutrition and reproductive efficiency of dairy animals. *Medycyna Weterynaryjna*, 74(6), 356-361. <http://dx.doi.org/10.21521/mw.6025>

- Kadarmideen, H. N., & Wegmann, S. (2003). Genetic parameters for body condition score and its relationship with type and production traits in Swiss Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 86(11), 3685-3693. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73974-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73974-5)
- Kadek, R., Filípek, J., Mikulková, K., Staffa, A., Šimková, I., Bartoň, J., & Illek, J. (2024). Effect of parenteral application of β -carotene, α -tocopherol, and selenium on selected antioxidant/oxidant parameters in dairy calves. *Acta Veterinaria Brno*, 93, S55-S67. https://actavet.vfu.cz/media/pdf/actavet_2024093110055.pdf
- Kanyima, B. M., Bage, R., Owiny, D. O., Ntallaris, T., Lindahl, J., Magnusson, U., & Musoke, M. G. (2014). Husbandry factors and the resumption of luteal activity in open and zero-grazed dairy cows in urban and peri-urban Kampala, Uganda. *Reproduction in Domestic Animals*, 49(4), 673-678. <https://doi.org/10.1111/rda.12346>
- Kasimanickam, R., Kasimanickam, V., Kastelic, J. P., & Ramsey, K. (2020). Metabolic biomarkers, body condition, uterine inflammation and response to superovulation in lactating Holstein cows. *Theriogenology*, 146, 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.02.006>
- Lacerda, V. V., Campos, G. S., Roso, V. M., Souza, F. P., Brauner, C. C., & Boligon, C. C. (2018). Effect of mature size and body condition of Nelore females on the reproductive performance. *Theriogenology*, 118, 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2018.05.036>
- Law, R. A., Young, F. J., Patterson, D. C., Kilpatrick, D. J., Wylie, G. R. A., & Mayne, C. S. (2009). Effect of dietary protein content on animal production and blood metabolites of dairy cows during lactation. *Journal of Dairy Science*, 92(3), 1001-1012. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1155>
- Leroy, J. L. M., Rizos, D., Sturmey, R., Bossaert, P., Gutierrez-Adan, A., & Van Hoeck, V. (2011). Intrafollicular conditions as a major link between maternal metabolism and oocyte quality: a focus on dairy cow fertility. *Reproduction, Fertility and Development*, 24(1), 1-12. <https://doi.org/10.1071/rd11901>
- Leroy, J. L. M., Vanholder, T., Mateusen, B., Christophe, A., Opsomer, G., & de Kruif, A. (2005). Non-esterified fatty acids in follicular fluid of dairy cows and their effect on developmental capacity of bovine oocytes in vitro. *Reproduction*, 130(4), 485-495. <https://doi.org/10.1530/rep.1.00735>
- López, L. N., Alvarez, I., Nuñez, R., Solano, D., Fuente, R., Pedroso, G., Palma, G., & Brem, G. (1996). Effect of body condition on the development competence of IVM/IVF bovine oocyte. *Theriogenology*, 45(1), 96.
- López Ruiz, L., Alvarez, N., Nuñez, I., Montes, I., Solano, R., Fuentes, D., Pedroso, R., Palma, G. A., & Brem, G. (1996). Effect of body condition on the developmental competence of IVM/IVF bovine oocytes. *Theriogenology*, 45(1), 292. [https://doi.org/10.1016/0093-691X\(96\)84765-0](https://doi.org/10.1016/0093-691X(96)84765-0)
- López-Gatius, F., Santolari, J., Yaniz, J., Rulland, M., & López-Bejar, M. (2002). Factors affecting pregnancy loss from gestation day 38 to 90 in lactating dairy cows from a single herd. *Theriogenology*, 57(4), 1251-1261. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(01\)00715-4](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(01)00715-4)
- Macdonald, K., & Roche, J. R. (2004). *Condition score made easy: condition scoring dairy herds* (1.^a ed.). DairyNZ. <https://www.dairynz.co.nz/media/1uykg3z3/body-condition-score-made-easy-field-guide-2024.pdf>
- Macmillan, K., Gobikrushanth, M., Helguera, I. L., Behrouzi, A., & Colazo, M. G. (2020). Relationships between early postpartum nutritional and metabolic profiles and subsequent reproductive

- performance of lactating dairy cows. *Theriogenology*, 151, 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.03.034>
- Maquivar, M., & Galina, C. (2010). Factors affecting the readiness and preparation of replacement heifers in tropical breeding environments. *Reproduction in Domestic Animals*, 45(5), 937-942. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2009.01348.x>
- McCarthy, S. D. P., Berry, D. P., Dillon, P., Rath, M., & Horan, B. (2007). Influence of Holstein-Friesian strain and feed system on body weight and body condition score lactation profiles. *Journal of Dairy Science*, 90(4), 1859-1869. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-501>
- McDowell, L. R. (2005). *Minerales para rumiantes en pastoreo en regiones tropicales* (2.ª ed.). IFAS Depto. Zootecnia, Universidad de la Florida.
- Meléndez, P., & Bartolomé, J. (2017). Advances on nutrition and fertility in dairy cattle: Review. *Revistas Mexicanas de Ciencias Pecuarias*, 8(4), 407-417. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v8i4.4160>
- Mora-Luna, R. E., Herrera-Angulo, A. M., Eslava-Tovar, J. F., Isea-Chávez, J. C., & Darghan, A. E. (2023). Metabolic profile of F1 Holstein × Zebu lactating dairy cows under grazing supplemented with two non-protein nitrogen sources. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24(3), e2858. https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_n
- Moraes, J. C. F., Hoff de Souza, C. J., Brauner, C. C., Pimentel, M. A., Benavides, M. V., & Ferraz, J. B. S. (2013). Utilização do escore de condição corporal pós-parto na identificação de vacas de corte mais férteis criadas em sistemas extensivos. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 21(3), 149–155.
- Pedroso, R. (2003). *Métodos biotécnicos para mejorar la fertilidad del ganado bovino en los programas de inseminación artificial e inducción y sincronización del celo* [Tesis doctoral, Universidad Agraria de la Habana]. <https://doi.org/10.29166/siembra.v12i1.7195>
- Pedroso, S. R., & Gutiérrez, F. (2024). Respuesta reproductiva a la suplementación parenteral de cobre en vacas en anestro e hipocuprémicas. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 35(1), e25346. <https://doi.org/10.15381/rivep.v35i1.25346>
- Pedroso, S. R., & Roller Gutiérrez, F. (2024). Respuesta reproductiva a la suplementación parenteral de cobre en vacas en anestro y hipocuprémicas. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 35(1), e25346.
- Peña, M., Gongora, A., & Estrada, J. (2007). Factores de crecimiento en el desarrollo folicular, embrionario temprano e implantación en la producción de embriones bovinos. *Revista MVZ Córdoba*, 12(1), 942-954. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-02682007000100010
- Pires, J. A. A., Larsen, T., & Leroux, C. (2022). Milk metabolites and fatty acids as noninvasive biomarkers of metabolic status and energy balance in early-lactation cows. *Journal of Dairy Science*, 105(1), 201–220. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20465>
- Puppel, K., & Kuczyńska, B. (2016). Metabolic profiles of cow's blood: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(13), 4297-4632. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7779>
- Rani, A., & Panneerselvam, C. (2001). Carnitine as a free radical scavenger in aging. *Experimental Gerontology*, 36(10), 1713-1726. [https://doi.org/10.1016/S0531-5565\(01\)00116-4](https://doi.org/10.1016/S0531-5565(01)00116-4)

- Reist, M. D., Erdin, D., von Euw, D., & Tschuemperlin, K. (2002). Estimation of energy balance at the individual and herd level using blood and milk traits in high-yielding dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 85(12), 3314-3327. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74420-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74420-2)
- Rhoads, M. L., Rhoads, R. P., Gilbert, R. O., Toole, R., & Butler, W. R. (2006). Detrimental effects of high plasma urea nitrogen levels on viability of embryos from lactating dairy cows. *Animal Reproduction Science*, 91(1-2), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2005.02.009>
- Roche, J. R., & Berry, D. P. (2006). Periparturient climatic, animal and management factors influencing the incidence of milk fever in grazing systems. *Journal of Dairy Science*, 89(7), 2775-2783. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72354-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72354-2)
- Roche, J. R., Friggens, N. C., Kay, J. K., Fisher, M. W., Stafford, K. J., & Berry, D. P. (2009). Invited Review: Body condition score and its associations with dairy cow productivity, health, and welfare. *Journal of Dairy Science*, 92(12), 5769-5801. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2431>
- Roche, J. R., Macdonald, K. A., Burke, C. R., Lee, J. M., & Berry, D. P. (2007). Associations among body condition score, body weight and reproductive performance in seasonal-calving dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 90(1), 376–391. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(07\)72639-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(07)72639-5)
- Roche, J. R., Meier, S., Heiser, A., Mitchell, M. D., Walker, C. G., & Crookenden, M. A. (2015). Effects of precalving body condition score and prepartum feeding level on production, reproduction, and health parameters in pasture-based transition dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 98(10), 7164-7182. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-9269>
- Sales, J. N. S., Dias, L. M. K., Viveiros, A. T. M., Pereira, M. N., & Souza, J. C. (2008). Embryo production and quality of Holstein heifers and cows supplemented with betacarotene and tocopherol. *Animal Reproduction Science*, 106(1-2), 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2007.04.001>
- Santos, J. E. P., Cerri, R. L. A., & Sartori, R. (2008). Nutritional management of the donor cow. *Theriogenology*, 69(1), 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2007.09.010>
- Santos, J. E. P., Juchem, S. O., Cerri, R. L. A., Galvão, K. N., Chebel, R. C., Thatcher, W. W., Dei, C. D., & Bilby, C. R. (2004). Effect of bST and reproductive management on reproductive performance of Holstein dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 87(4), 868-881. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73231-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73231-2)
- Shahzad, M., Cao, J., Ali Kolachi, H., Ayantoye, J., Yu, Z., Niu, Y., & Wan, P. (2024). Desentrañando los metabolitos característicos del líquido folicular en folículos de ganado lechero que crecen bajo balance energético negativo: un enfoque in vitro. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(23), 12629. <https://doi.org/10.3390/ijms252312629>
- Sheehy, M. R., Fahey, A. G., Aungier, S. P. M., Carter, F., Crowe, M. A., & Mulligan, F. J. A. (2017). Comparison of serum metabolic and production profiles of dairy cows that maintained or lost body condition 15 days before calving. *Journal of Dairy Science*, 100(1), 536–547. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11206>
- Snijders, S. E., Dillon, P., O'Callaghan, D., & Boland, M. P. (2000). Effect of genetic merit, milk yield, body condition and lactation number on in vitro oocyte development in dairy cattle. *Theriogenology*, 53(4), 981-989. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(00\)00244-2](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(00)00244-2)

- Sordillo, L., & Raphael, W. (2013). Significance of metabolic, stress, lipid mobilisation and inflammation on transition cows disorders. *The Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 29(2), 267-278. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2013.03.002>
- Suttle, F. (2021). *Mineral Nutrition of Livestock* (5.^a ed.). British Library. <https://www.asau.ru/files/pdf/3319078.pdf>
- Šmigoc, J., Pavšič, K. V., Štrajhar, B., Stvarnik, M., & Mrkun, J. (2023). Preventive supplementation of vitamin E and selenium as a factor in improving the success rate of embryo transfer in cattle. *Acta Veterinaria*, 73(1), 87-101. <https://doi.org/10.2478/acve-2023-0007>
- Talukder, S., Kendra, L., Kerrisk, L., García, G., & Celi, P. (2017). Role of oxidative-antioxidant balance in reproduction of domestic animals. *Animal Production Science*, 57(8), 1588-1597. <http://dx.doi.org/10.1071/AN15619>
- Thatcher, W. W., Santos, J. E. P., Silvestre, F. T., Kim, I. H., & Staples, C. R. (2010). Perspective on physiological/endocrine and nutritional factors influencing fertility in post-partum dairy cows. *Reproduction in Domestic Animals*, 45(3), 2-14. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2010.01664.x>
- Torrez, E., García, J. E., Véliz, F. G., Leyva, C., Macías-Cruz, U., Hernández Bustamante, J. D., & Mellado, M. (2020). Influence of blood metabolites and body condition score at parturition on fertility and milk yield in Holstein cows. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 34(4), 291-304. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.v34n4a06>
- Toscano, A., Giannuzzi, D., Pegolo, S., Vanzin, A., Bisutti, V., Gallo, L., Trevisi, E., Cecchinato, A., & Schiavon, S. (2023). Associations between the detailed milk mineral profile, milk composition, and metabolic status in Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 106(9), 6577–6591. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-23161>
- Vargas, M., Gaona, C., Perez, H. N., Niño, J. F., & García, K. (2021). Efecto de la suplementación energético-proteica sobre el desempeño productivo en vacas Romosinuano durante el pre y posparto. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 32(6), e20125. <https://doi.org/10.15381/rivep.v32i6.20125>
- Veliz, D. D., Guerra, R., Falcón, R., Santana, Y., Ortiz, J., Rodríguez, M., & González, G. (2004). Parámetros genéticos y no genéticos que afectan la reproducción en la raza Santa Gertrudis. *Revista Cubana de Reproducción Animal*, 30, 53-58.
- Viamonte, María Isabel. (2010). *Sistema Integrado de manejo para incrementar la productividad en vacas de la raza Criolla cubana* [Tesis doctoral, ICA]. <https://isbncuba.ccl.cerlalc.org/catalogo.php?mode=detalle&nt=30018>
- Viera, R. J. (2011). Transtornos endócrinos e metabólicos na reprodução de vacas leiteiras. *Revista Brasileira de Reprodução Animal*, 35(2), 286-292. <https://www.cbra.org.br/pages/publicacoes/rbra/v35n2/RB346%20Vieira%20pag286-292.pdf>
- Walter, L. L., Gärtner, T., Gernand, E., Wehrend, A., & Donat, K. (2022). Effects of parity and stage of lactation on trend and variability of metabolic markers in dairy cows. *Animals*, 12(8), 1008. <https://doi.org/10.3390/ani12081008>
- Wathes, D. C., Taylor, V. J., Cheng, Z., & Mann, G. E. (2003). Follicle growth, corpus luteum function and their effects on embryo development in the post partum cow. *Reproduction Supplement*, 61, 219–237. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14635938/>

- Zambrano, J. G., Pedroso, R., & Gutiérrez, R. (2025). Suplementación de micronutrientes, salud y eficiencia de la reproducción asistida en la hembra bovina. *Siembra*, 12(1), 1-25. <https://doi.org/10.29166/siembra.v12i1.7195>
- Zotto, R. Dal, De Marchi, M., Dalvit, C., Cassandro, M., Gallo, L., Carnier, P., & Bittante, G. (2007). Heritabilities and genetic correlations of body condition score and calving interval with yield, somatic cell score, and linear type traits in Brown Swiss cattle. *Journal of Dairy Science*, 90(12), 5737-5743.