

Impacto del estrés térmico sobre los parámetros productivos en la ganadería doble propósito en trópico bajo: revisión de literatura.

Corporación Universitaria Remington.
Facultad de Medicina Veterinaria.
Medicina Veterinaria.

Tomás Rendón Burgos.
Dr. Gabriel Diaz Pacheco. MVZ Universidad de Córdoba.

Opción de Trabajo de grado Diplomado.
2026

Dedicatoria

"A mi hija."

Agradecimientos

Primero a "DIOS", por su infinita misericordia y por acompañarme en cada paso de este camino académico, todo honor y toda gloria sean para "Él."

A mis profesores que con su compromiso, amabilidad y constancia dieron todo de ellos para que nosotros los educandos creciéramos cada día más como personas de bien, personas íntegras y éticas, mis más infinitos agradecimientos siempre estaré en deuda con todos ustedes.

Contenido

Resumen	4
Palabras clave:	5
Abstract	6
Pregunta orientadora de la búsqueda	7
Metodología de la búsqueda de la información	8
Sustentación teórica de la pregunta	12
Características de las fuentes de evidencia	12
El estrés calórico y el Índice de Temperatura y Humedad (THI)	13
Cálculo e interpretación del Índice de Temperatura y Humedad (ITH)	13
Mecanismos fisiológicos y moleculares del estrés calórico	15
Impacto sobre la producción de leche	16
Impacto sobre la producción de carne y la eficiencia alimentaria	16
Impacto sobre los parámetros reproductivos	17
Estrategias de adaptación y mitigación	18
Impacto documentado sobre la producción de leche	18
Impacto documentado sobre producción de carne y eficiencia alimentaria	19
Impacto documentado sobre los parámetros reproductivos	19
Estrategias de mitigación documentadas	19
Discusión.....	21
Respuesta sistémica al estrés calórico: jerarquía fisiológica	21
Producción de leche: dilema genético del doble propósito	21
Reproducción y carne: impacto multiplicador y soluciones genómicas	21
Estrategias de mitigación: hacia un manejo integrado	22
Conclusiones	24
Bibliografía	26

Resumen

El estrés calórico representa una de las principales limitaciones para la productividad bovina en los sistemas ganaderos de trópico bajo, donde las condiciones de temperatura ambiental, humedad relativa y radiación solar superan de manera crónica la zona de termorregulación del ganado bovino. El presente trabajo constituye una revisión bibliográfica descriptiva que tuvo como objetivo identificar de qué manera el estrés calórico afecta negativamente los parámetros productivos en la explotación ganadera doble propósito en trópico bajo. La búsqueda se realizó en las bases de datos Scopus, Lens, PubMed y ScienceDirect con restricción temporal al período 2020–2026. Tras aplicar criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron 29 artículos científicos indexados de libre acceso, en idioma inglés y español. Los resultados de la revisión demuestran que el Índice de Temperatura y Humedad (THI) es el principal indicador del grado de estrés calórico. La producción de leche disminuye de forma progresiva por encima de THI 69, con pérdidas que se amplifican en razas cruzadas con mayor proporción de genes taurinos. La ganancia de peso y la eficiencia alimentaria se ven comprometidas cuando el THI supera 76, asociadas a reducción del consumo voluntario de alimento, aumento del jadeo y alteraciones metabólicas. La reproducción es el parámetro más sensible, con efectos negativos sobre la calidad embrionaria, la ovulación y la fertilidad documentados desde THI 72. Las estrategias de mitigación más efectivas incluyen los sistemas silvopastoriles, el rediseño de instalaciones y la selección genética de razas tolerantes al calor como el *Bos indicus* y sus cruces con razas criollas colombianas. Se concluye que el estrés calórico afecta de manera global e interrelacionada todos los parámetros productivos del sistema doble propósito en trópico bajo, y que la implementación de estrategias preventivas y de adaptación es indispensable para sostener la productividad ganadera frente al escenario de cambio climático proyectado para Colombia y la región tropical latinoamericana.

Palabras clave:

Estrés térmico, trópico bajo, índice de temperatura y humedad, ganadería doble propósito, adaptación.

Abstract

Heat stress is one of the main limitations to bovine productivity in lowland tropical livestock systems, where ambient temperature, relative humidity, and solar radiation chronically exceed the thermoneutral zone of cattle. This study is a descriptive bibliographic review aimed at identifying how heat stress negatively affects productive parameters in dual-purpose cattle farming in the low tropics. The search was conducted in the Scopus, Lens, PubMed, and ScienceDirect databases, restricted to the period 2020–2026. After applying inclusion and exclusion criteria, 29 open-access indexed scientific articles in English and Spanish were selected. The review results demonstrate that the Temperature-Humidity Index (THI) is the primary indicator of heat stress severity. Milk production decreases progressively above THI 69, with greater losses in crossbred cows carrying higher proportions of taurine genes. Weight gain and feed efficiency are compromised when THI exceeds 76, associated with reduced voluntary feed intake, increased panting, and metabolic alterations. Reproduction is the most sensitive parameter, with negative effects on embryo quality, ovulation, and fertility documented from THI 72. The most effective mitigation strategies include silvopastoral systems, facility redesign, and genetic selection of heat-tolerant breeds such as *Bos indicus* and its crosses with Colombian Creole breeds. It is concluded that heat stress globally and interrelatedly affects all productive parameters of the dual-purpose system in the low tropics, and that implementing preventive and adaptive strategies is essential to sustain livestock productivity under the climate change scenario projected for Colombia and the Latin American tropical region.

Keywords:

Heat stress, low tropics, temperature-humidity index, dual-purpose cattle, adaptation.

Pregunta orientadora de la búsqueda

Thornton et al. (2021) estimaron con proyecciones climáticas que el número de días de estrés calórico extremo aumentará para todas las especies ganaderas del trópico durante el siglo XXI, siendo los países de ingresos bajos y medios los más vulnerables. Carvajal et al. (2021) cuantificaron que el 7% de la población bovina mundial está actualmente expuesta a condiciones de calor peligrosas, cifra que podría escalar hasta el 48 % antes de 2100; las zonas tropicales serían las primeras en alcanzar ese umbral antes de 2050. Thornton et al. (2022) proyectaron pérdidas productivas directas en carne y leche en los sistemas extensivos tropicales durante el presente siglo. En Colombia, Velásquez-Mosquera y Navas-Panadero (2021) registraron en el Piedemonte llanero un THI permanentemente superior a 82 durante todo el período experimental con novillos Brahman cruzados con razas criollas, valor que supera todos los umbrales de deterioro productivo documentados en la literatura científica revisada.

Los artículos revisados coinciden en que el estrés calórico afecta simultáneamente todos los parámetros del sistema doble propósito: la producción de leche cae a partir de THI 69 (Mbutia et al., 2021), la calidad embrionaria se ve comprometida desde THI 72 (Ratchamak et al., 2021), y la eficiencia alimentaria se deteriora cuando el THI supera 76 (Silva Neto et al., 2025). García et al. (2020) evidenciaron en los llanos orientales colombianos que el índice de carga calórica (HLI) resultó más predictivo que el THI convencional para evaluar la respuesta fisiológica de razas criollas en sistemas de pastoreo extensivo, al incorporar la radiación solar como variable. En este contexto, la presente revisión busca responder la siguiente pregunta: **¿De qué manera el estrés calórico afecta negativamente los parámetros productivos en los sistemas ganaderos de doble propósito en el trópico bajo?**

Metodología de la búsqueda de la información

Este trabajo sigue una metodología de revisión bibliográfica descriptiva de alcance documental. El propósito fue identificar, seleccionar y analizar información científica actualizada sobre cómo los factores ambientales del trópico bajo favorecen la aparición del estrés calórico y qué consecuencias tiene sobre la productividad de la ganadería de doble propósito. Se cubrió un período de seis años, desde 2020 hasta 2026.

La búsqueda se realizó en cuatro bases de datos académicas: Scopus, Lens, PubMed y ScienceDirect. Se utilizaron términos normalizados con conectores booleanos AND (para la búsqueda en inglés) e Y (para la búsqueda en español), se utilizó la ecuación booleana "Heat stress" AND "tropic" AND "bovine" AND "temperature humidity index" AND "production" en inglés, y en español "Estrés térmico" Y "trópico" Y "bovino" Y "índice de humedad temperatura" Y "producción".

Los criterios de inclusión fueron: estudios realizados en ecosistemas de trópico bajo, con enfoque en estrés térmico en bovinos; publicados entre 2020 a 2026; de libre acceso; procedentes de revistas indexadas; en idioma inglés o español. Para los criterios de exclusión se descartaron documentos que no tuvieran relación con ecosistemas de trópico bajo o que fueran de especies diferentes a la bovina.

La búsqueda en inglés arrojó inicialmente 518 documentos en las cuatro bases de datos. Tras aplicar el primer filtro que combinó restricción temporal, disponibilidad de texto gratuito, idioma inglés y tipo de artículo, el número se redujo a 79. Luego, la revisión manual de los resúmenes permitió descartar artículos sin relación directa con bovinos, trópico bajo o producción ganadera, hasta llegar a 31 artículos seleccionados. Paralelamente, la búsqueda en español, en las bases de datos Scopus, PubMeb, Science Direct, arrojó un total de 0 documentos, en la base de datos Lens, se encontró 37 documentos sin filtros; con el primer filtro se obtuvo 10, y tras la revisión de resúmenes quedaron 5 artículos adicionales. Al consolidar ambas búsquedas se contabilizaron 36 documentos, de los cuales se identificaron y eliminaron 7 duplicados, resultando en un corpus definitivo de 29 artículos únicos.

Tabla 1. Resultados de la búsqueda bibliográfica por base de datos e idioma. Fuente propia.

Base de datos	Idioma	Sin filtro	Filtro 1*	Rev. Manual	Tot. manual
Scopus	Inglés	17	10	8	8
Lens	Inglés	153	28	6	6
PubMeb	Inglés	30	26	13	13
ScienceDirect	Inglés	318	15	4	4
Sub-Tot inglés		518	79	31	31
Lens	Español	37	10	5	5
Duplicados	—	—	—	—	7
TOTAL		555	89	36	29 únicos*

*Filtro 1: temporalidad 2020–2026, texto gratuito, idioma inglés o español, tipo revisión. **31 artículos (inglés) + 5 artículos (español) = 36 totales → 7 duplicados eliminados = 29 artículos únicos.

Selección de fuentes de evidencia

Los 29 artículos seleccionados provienen de revistas internacionales indexadas de acceso abierto y cubren el período 2020–2026. El 44,8 % de los estudios provienen de Brasil; el 13,8 % incluyen datos directos de Colombia; el 13,8 % de Asia (India, Tailandia, Vietnam); y el 27,6 % de África subsahariana y otras regiones tropicales.

Tabla 2. Matriz de los 29 artículos seleccionados con resumen y DOI. Fuente propia.

Autor / Año	Resumen del artículo	DOI
Araúz et al. (2020)	250 vacas cebuínas y cruzadas, 14 fincas, trópico húmedo bajo de Panamá. THI máximo 86,59 a 1:00 PM. Producción: 692 kg (cebuínas), 1267 kg (½ Bos Taurus) y 2.012 kg (¾ Bos Taurus por lactación)	10.48204/j.ia.v2n2a4
Bang et al. (2021)	32 granjas lecheras vietnam + 1 m de alerón reduce THI 1,42 unidades y T° O,87°C. Ningún tipo de corral fue universalmente superior.	10.3390/ani11020351
Bang et al. (2022)	Termografía infrarroja para evaluar estrés calórico y predecir reducción de leche en granjas tropicales de pequeños productores de Vietnam de forma no invasiva.	10.3168/jds.2021-21343
Carvajal et al. (2021)	Análisis espaciotemporal, 10 zonas agroclimáticas. 7% bovinos mundiales expuestos a calor peligroso; podría escalar al 48% antes de 2100. Zonas tropicales alcanzarán umbral antes del 2050.	10.1016/j.scitotenv.2021.149661
Carvalho et al. (2021)	615 vacas Girolando (½, ¾ y ⅞ Holstein x Gyr), 6 granjas Brasil. °T vaginal 39,1°C entre 12:00-2:00 h.	10.1093/tas/txab138
Carvalho et al. (2020)	SSP con eucalipto orientaciones E-O y N-S en Brasil vs. Sin sombra. SSP mejoran confort térmico independientemente de la orientación; el estrés persiste según hora y distancia a hileras.	10.1590/1807-1929/agriambi.v24n4p266-273
Chacón et al. (2023)	Toros <i>Brahman</i> , Orinoquía colombiana. Proteína BSP del plasma seminal más abundantes en época seca. Toros con	10.21315/tlsr2023.34.3.14

	mayor % de preñez comparten mapas proteicos seminales similares.	
Correa-Calderón et al. (2022)	Revisión: la reducción del consumo de MS es el mecanismo principal de pérdida de leche por calor; persiste pérdida adicional sobre síntesis mamaria directa, aunque se controle el consumo.	10.22319/rmcp.v13i2.5832
dos Santos et al. (2022)	ITSC e ITH más precisos que THI bajo radiación solar. Vacas reducen pastoreo espontáneamente con irradiancia de >550 W/m ² (8:00-16:00h) Proponen pastoreo nocturno y paneles solares.	10.3389/fvets.2022.988775
Elayadeth-Meethal et al. (2021)	Gen ATP1A1 con expresión diferencial en razas Bos Taurus, indicus tolerantes al calor (Vechur, Kasaragod) vs cruza susceptibles, India. Propuesto como marcador MAS para tolerancia al calor.	10.3390/ani11082368
Islamizad et al. (2020)	Estrés calórico crónico leve en <i>Holstein</i> . Reduce consumo de MS modifica flujo sanguíneo periférico y reduce longitud y densidad de papilas ruminales, comprometiendo absorción de AGV.	10.3168/jds.2020-18417
Fatoni et al. (2022)	Cruces <i>Thai-Holstein</i> . h ² rasgos reproductivos <0,10 ssGBLUP ofrece mayor precisión que métodos multietapa para rasgos de baja heredabilidad como fertilidad bajo estrés calórico.	10.3390/vetsci9040163
García et al. (2020)	Llanos orientales colombianos (4°05'N,73°34'E). Diseño y validación de sudómetro no invasivo para razas criollas. HLI más correlacionado con evaporación cutánea.	10.31893/jabb.20029
McManus et al. (2026)	48 vacas <i>Gyr</i> y <i>Girolando</i> , 2 años, Cerrado brasileño. Sombra de <i>Eucalyptus urograndis</i> : menor T° corporal, FR y jadeo con THI > 74. Precisión discriminante > 92 % por sistema de manejo.	10.1007/s00484-025-03063-7
Mbuthia et al. (2021)	131.380 registros test-day (<i>Friesian</i> , <i>Arshire</i> , <i>Jersey</i> , <i>Guemsey</i>) Kenia 2000-2017. Umbral THI ~69 (22°C TA) para inicio pérdida de producción. Variación individual documentada.	10.1016/j.animal.2021.100222
Naranjo-Gomez et al. (2021)	Revisión: calor reduce blastocitos, implantación y aumenta la mortalidad embrionaria temprana vía sobreexpresión HSP, alteración genes competencia oocito y menor actividad mitocondrial.	10.1016/j.heliyon.2021.e06570
Neto et al. (2026)	22.838 Nellore, GWAS bajo 3 gradientes THI (66/74/81). 51 SNPs-RFI (PIPOX, GTF2F2, KCTDA) y 136 SNPs-DMI (NCAPG, LCORL, FAM13A) Redes génicas se reconfiguran con el THI.	10.1038/s41598-025-33952-1
Niyonzima et al. (2022)	53.730 registros 183 vacas, Ruanda, -0,11 kg leche/unida THI sobre umbra. <i>Ankole-Friesian</i> con caídas más pronunciadas que raza autóctona. Umbral THI 66-69.	10.1007/s11250-022-03092-z
Oloo et al. (2025)	Vacas cruzadas Kenia h ² AFC=0,17; =0,06; MY=0,35. Correlación genética positiva resiliencia al calor- fertilidad. Correlación antagónica resiliencia-producción de leche.	10.1111/jbg.12933
Pereira Bartotti et al. (2024)	Novillos Nellore, ICLF Cerrado brasileño. Animales pastorean en horas más calurosas del día; mayor tasa consumo forraje, eficiencia de conversión y productividad del agua vs. Sistema convencional	10.1016/j.animal.2024.101117
Philip Thornton et al. (2022)	Modelado global del siglo XXI. Pérdidas productivas directas en carne y leche en sistemas extensivos tropicales. sistemas de bajos ingresos los más afectados. Publicado The Lancet Planetary Health.	10.1016/S2542-5196(22)00002-X
Ratchamak et al. (2021)	75 registros, 12 <i>Thai-Holstein</i> superovuladas, Tailandia efectos negativos sobre folículos, CL, tasa ovulación y	10.3390/vetsci8110270

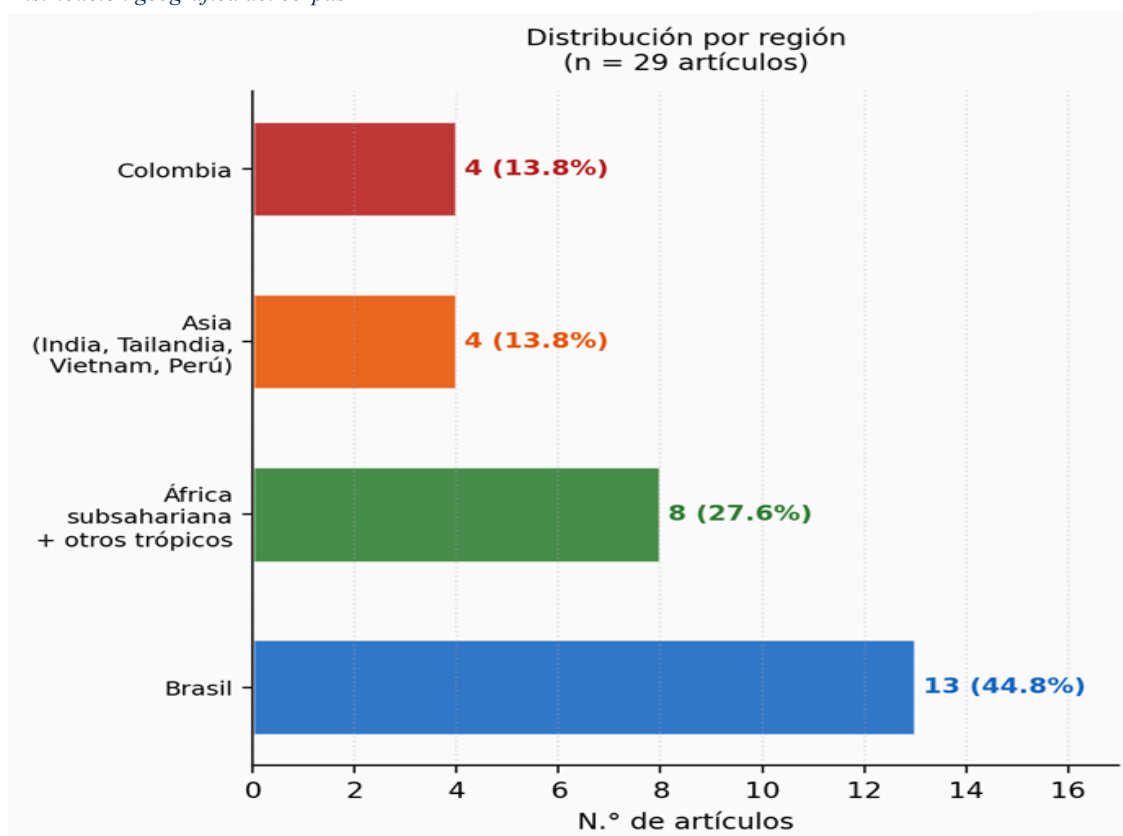
	embriones transferidos desde THI 72; severos con THI >77 (P<0,05)	
Robson Mateus et al. (2022)	Modelos de IA multimodelos en vacas lecheras. La adaptación al estrés térmico involucra redes complejas e intercomunicadas de variables adaptativa; proceso sistémico no modelable linealmente	10.1016/j.atech.2025.101128
Romo Valdez et al. (2022)	Bovinos carne en finalización intensiva, México. Relación directa THI-frecuencia e intensidad del jadeo. Mayor gasto energético respiratorio que compite con síntesis de tejido muscular.	10.22319/rmcp.v13i2.5977
Segura Portocarreño et al. (2025)	Tropico peruano. Factores agroclimáticos influyen significativamente en eficiencia de multiovulación. Variables entre épocas del año reflejan impacto del THI sobre respuesta ovárica.	10.3389/fvets.2025.1565265
Silva Neto et al. (2025)	22.838 <i>Nellore</i> , 21 granjas, Brasil 2011-2023. h ² DMI 0,22-0,39; h ² RFI0,08. Correlaciones genéticas <0,80 cuando THI>76; interacciona GXE significativa.	10.1016/j.animal.2025.101612
Thornton et al. (2021)	Proyecciones CMIP6. Días de estrés calórico extremo aumentarán para todos los bovinos tropicales durante el siglo XXI. Países de ingresos bajos y medios los más vulnerables.	10.1111/gcb.15825
Velayudhan et al. (2022)	Vacas cruzadas, sabana tropical India. THI afecta FR, T° piel, PLT, PCT, PDWc, producción de leche y expresión de HSP70, IFNβ, IGF-1, GH Y TNFα.	10.3390/biology12010026
Velasquez-Mosquera y Navas- Palermo (2021)	Brahman x criollo BON y Romosinuano, piedemonte llanero (Paratebueno, Colombia). THI> 82 permanentemente. Cruces x Romosinuano mejor ganancia de peso que grupos puros (p=0,013)	10.19052/mv.vol1.iss42.8

Sustentación teórica de la pregunta

Características de las fuentes de evidencia

Los 29 artículos seleccionados provienen de revistas internacionales indexadas y cubren el período 2020–2026. En términos geográficos, el 44,8 % de los estudios se realizaron en Brasil; el 13,8 % incluyen datos directos de Colombia; el 13,8 % provienen de Asia (India, Tailandia, Vietnam y Perú); y el 27,6 % restante de África subsahariana y otras regiones tropicales (gráfica 1). En cuanto al tipo de estudio, la muestra incluye 12 trabajos experimentales, 10 de modelado o genómica, y 7 revisiones bibliográficas. La descripción de cada artículo con su respectivo DOI se presenta en la Tabla 2 de la sección de Metodología.

Gráfica 1. Distribución geográfica del corpus



Gráfica 1. Distribución geográfica de los 29 artículos seleccionados en la revisión bibliográfica (2020–2026). La banda sombreada corresponde a la zona intertropical. El tamaño de los círculos es proporcional al número de artículos por región. Elaboración propia.

El estrés calórico y el Índice de Temperatura y Humedad (THI)

García et al. (2020) en los llanos orientales colombianos (4°05'N, 73°34'E) diseñaron y validaron un sudómetro no invasivo para medir la evaporación cutánea en razas criollas colombianas, encontrando que el índice de carga calórica (HLI) estuvo más correlacionado con la sudoración que el THI convencional, indicando que en sistemas de pastoreo con alta radiación solar la carga calórica requiere mecanismos de regulación de alta intensidad. Dos Santos et al. (2022) propusieron que en sistemas de pastoreo tropical el índice ITSC y el ITS son herramientas más precisas que el THI convencional para predecir el estrés en vacas lecheras, al incorporar la radiación solar directa como variable. Velásquez-Mosquera y Navas-Panadero (2021) registraron en el Piedemonte llanero de Cundinamarca un THI permanentemente superior a 82 durante su estudio con novillos Brahman cruzados con razas criollas BON y Romosinuano. Carvajal et al. (2021) cuantificaron que el 7 % de bovinos mundiales está actualmente expuesto a calor peligroso, con proyecciones que alcanzan el 48 % antes de 2100 en un escenario de emisiones crecientes.

Cálculo e interpretación del Índice de Temperatura y Humedad (ITH)

El Índice de Temperatura y Humedad (ITH), también conocido como THI por sus siglas en inglés, se calcula a partir de dos variables ambientales de fácil medición: la temperatura de bulbo seco (Tdb) en grados Celsius y la humedad relativa (HR) en porcentaje. Todos los estudios del corpus que cuantificaron el estrés calórico se basaron en esta ecuación:

$$ITH = (0,8 \times Tdb) + [(HR / 100) \times (Tdb - 14,4)] + 46,4$$

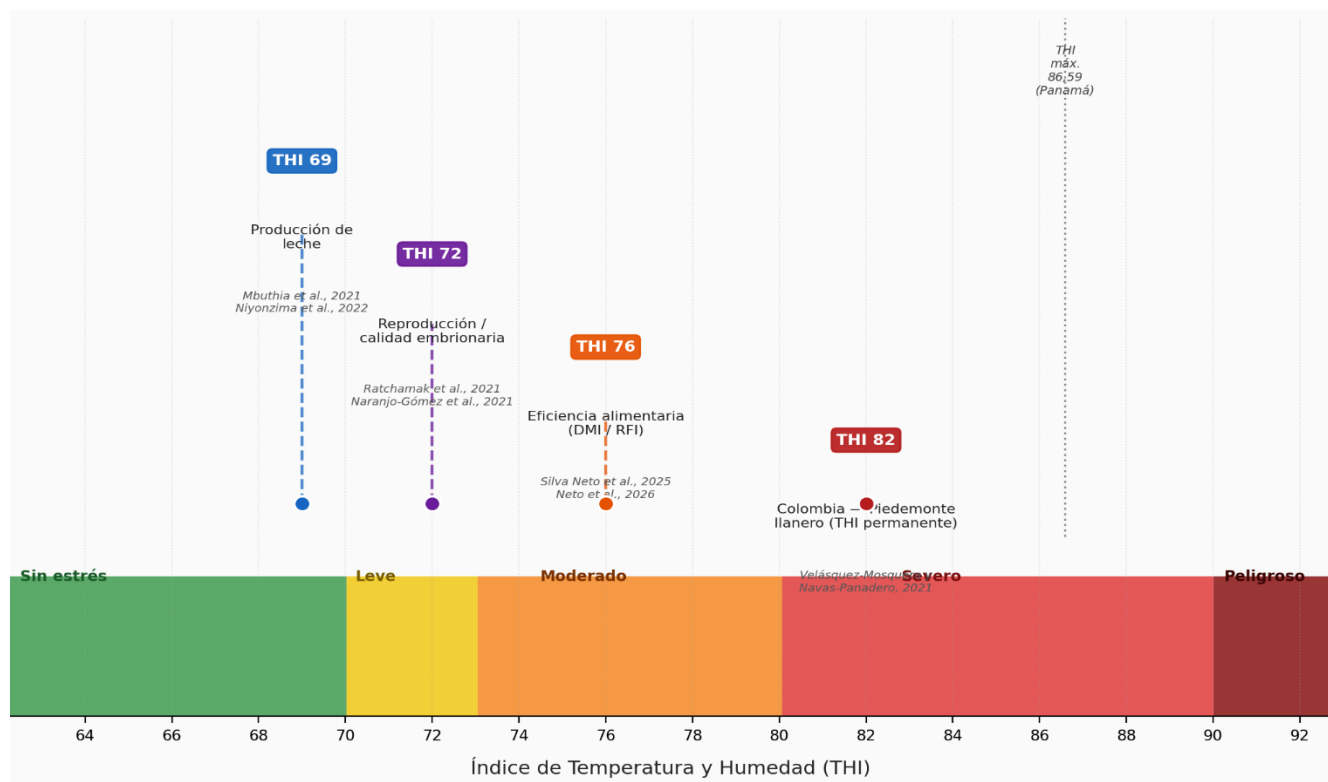
Donde Tdb es la temperatura del aire medida con termómetro de bulbo seco y HR es la humedad relativa del ambiente medida con higrómetro. Para demostrar que esta ecuación es la utilizada en los artículos del corpus, basta aplicarla con los datos que Araúz et al. (2020) reportaron en su estudio en el trópico húmedo bajo de Panamá: a la 1:00 PM registraron una temperatura de bulbo seco de 32,7 °C y una humedad relativa de 76,71 %. Sustituyendo: $ITH = (0,8 \times 32,7) + [(76,71/100) \times (32,7 - 14,4)] + 46,4 = 26,16 + 14,04 + 46,4 = 86,60$, coincidiendo con el ITH de 86,59 que los autores informaron. Silva Neto et al. (2025) calcularon el ITH para los 21 predios de su estudio en Brasil usando datos de

temperatura y humedad relativa promedios tomados de la base meteorológica NASA POWER. Thornton et al. (2021) aplicaron la misma ecuación sobre las salidas de los modelos climáticos CMIP6 para proyectar el ITH a nivel global durante el siglo XXI. García et al. (2020) compararon el ITH con el HLI y encontraron que, en el pastoreo extensivo bajo alta radiación solar directa, el HLI es más predictivo de la respuesta fisiológica de las razas criollas colombianas.

Tabla 3. Escala de interpretación del Índice de Temperatura y Humedad (ITH) para bovinos. Elaboración propia a partir de los umbrales documentados en el corpus bibliográfico.

Rango ITH	Nivel de estrés calórico	Efecto sobre la productividad bovina
<70	Sin estrés (zona de confort)	Producción y reproducción en condiciones óptimas
70-72	Estrés leve	Inicio de pérdida de producción de leche (Mbutia et al, 2021)
73-79	Estrés moderado	Reducción marcada de leche; fertilidad comprometida desde ITH 72 (Ratchamak et al. 2021)
80-89	Estrés severo	Pérdidas severas en todos los parámetros, conducta agonista aumenta (Zazueta et al., 2021)
≥90	Estrés muy / Peligroso	Riesgo de mortalidad; Colombia Piedemonte supera ITH 82 de forma crónica (Velasquez-Mosquera y Navas-Panadero, 2021)

Gráfica 2. Umbrales del Índice de Temperatura y Humedad (THI)



Gráfica 2. Umbrales del Índice de Temperatura y Humedad (THI) por parámetro productivo en ganadería doble propósito en trópico bajo. La línea discontinua de Colombia indica el THI permanente registrado en el Piedemonte llanero. Elaboración propia con base en el corpus bibliográfico (2020–2026).

Mecanismos fisiológicos y moleculares del estrés calórico

Velayudhan et al. (2022) evaluaron vacas lecheras cruzadas en un clima de sabana tropical en India y encontraron que el THI tuvo efectos significativos sobre la frecuencia respiratoria, la temperatura superficial de la piel, el volumen plaquetario medio, el plaquetocrito, el ancho de distribución plaquetaria, la producción de leche y su composición, así como sobre la expresión génica de HSP70, IFN β , IGF-1, GH y TNF α . En el estudio realizado por Elayadeth-Meethal et al. (2021), analizaron la expresión diferencial del gen ATP1A1 —que codifica la subunidad catalítica de la bomba Na $^{+}$ /K $^{+}$ ATPasa— en razas *Bos taurus indicus* tolerantes al calor frente a cruza susceptibles en India, encontrando que las razas adaptadas mostraron expresión diferencial de ATP1A1 que favorece la resiliencia al estrés oxidativo y la señalización celular, y propusieron su uso como marcador MAS para tolerancia al calor. Eslamizad et al. (2020) demostraron que el estrés calórico crónico leve reduce el consumo de materia seca, modifica el flujo sanguíneo periférico y produce adaptaciones morfofuncionales en las papilas del

rumen —reducción de su longitud y densidad—, comprometiendo la absorción de AGV y la disponibilidad de energía para la síntesis láctea, independientemente del nivel de consumo voluntario. Por su parte, Robson Mateus et al. (2025) confirmaron mediante modelos de inteligencia artificial que la adaptación de vacas lecheras al estrés térmico involucra redes complejas e interconectadas de variables adaptativas que no pueden ser modeladas linealmente.

Impacto sobre la producción de leche

Mbuthia et al. (2021) modelaron los efectos del estrés calórico con 131.380 registros test-day de vacas Friesian, Ayrshire, Jersey y Guernsey en Kenia entre 2000 y 2017, identificando mediante modelos de regresión aleatoria un umbral de THI de aproximadamente 69 unidades, a partir del cual comienza la pérdida de producción. Por su parte, Niyonzima et al. (2022) cuantificaron en 53.730 registros de 183 vacas en Ruanda una pérdida de $-0,11$ kg de leche por unidad de THI por encima del umbral, con caídas más pronunciadas en cruces Ankole-Friesian que en la raza autóctona.

En el trópico húmedo de Panamá, Araúz et al. (2020) documentaron en 14 fincas —con THI máximo de 86,59— producciones de 692 kg (cebuínas), 1.267 kg ($\frac{1}{2}$ Bos taurus) y 2.012 kg ($\frac{3}{4}$ Bos taurus) por lactación. Carvalheira et al. (2021) encontraron en 615 vacas Girolando que la temperatura vaginal tiene una correlación positiva moderada con el THI ($r^2 = 0,45$; $P < 0,001$), con un incremento de $0,05$ °C por unidad de THI, y que las vacas con $\frac{3}{4}$ y $\frac{7}{8}$ genes Holstein superaron $39,1$ °C entre las 12:00 y 20:00 horas.

Desde una perspectiva fisiológica, Correa-Calderón et al. (2022) señalaron que la disminución del consumo de MS es el mecanismo inmediato principal, pero que incluso controlando el consumo persiste una pérdida adicional atribuible a efectos directos sobre la síntesis mamaria. Finalmente, Bang et al. (2022) confirmaron que la termografía infrarroja permite detectar el nivel de estrés de forma no invasiva y predecir la reducción de producción en granjas de pequeños productores en Vietnam.

Impacto sobre la producción de carne y la eficiencia alimentaria

Silva Neto et al. (2025) evaluaron a 22.838 bovinos Nellore en 21 granjas brasileñas entre 2011 y 2023, encontrando que la heredabilidad del DMI varió entre 0,22 y 0,39, y la del RFI entre 0,08 y 0,28 a lo largo del gradiente de THI. Cuando el THI superó 76, las correlaciones genéticas descendieron por

debajo de 0,80, evidenciando una interacción genotipo-ambiente significativa que invalida la selección realizada en ambientes frescos.

En la misma línea, Neto et al. (2026) mediante estudios de asociación del genoma completo (GWAS) identificaron 51 SNPs para RFI —con genes candidatos PIPOX, GTF2F2, KCTD4— y 136 SNPs para DMI —con genes NCAPG, LCORL, FAM13A— con redes génicas que se reconfiguran con el gradiente de THI. Desde el punto de vista comportamental y fisiológico, Romo Valdez et al. (2022) documentaron relación directa entre el THI y la frecuencia e intensidad del jadeo en bovinos de carne en México, con mayor gasto energético que compite con la síntesis de tejido muscular. Zazueta et al. (2021) encontraron que con $\text{THI} > 82$ las tasas de amenazas (34 vs. 14; $P < 0,05$) y topetazos (20 vs. 12; $P < 0,01$) fueron significativamente mayores. En Colombia, Velásquez-Mosquera y Navas-Panadero (2021) evidenciaron que los cruces Brahman \times Romosinuano mostraron mejor ganancia de peso que los grupos puros bajo $\text{THI} > 82$ ($p = 0,013$). Pereira Barsotti et al. (2024) confirmaron que los sistemas integrados ICLF en Brasil permitieron a los novillos pastorear durante las horas más calurosas con mayor consumo de forraje y mejor eficiencia de conversión.

Impacto sobre los parámetros reproductivos

Naranjo-Gómez et al. (2021) revisaron que el calor disminuye la producción de blastocistos, reduce la tasa de implantación e incrementa la mortalidad embrionaria temprana mediante sobreexpresión de genes HSP, alteración de genes de competencia del oocito y disminución de la actividad mitocondrial. Ratchamak et al. (2021) cuantificaron en 75 registros de 12 Thai-Holstein superovuladas en Tailandia que los efectos negativos sobre la respuesta ovárica comienzan a $\text{THI} 72$ y son severos con $\text{THI} > 77$ ($P < 0,05$). Chacón et al. (2023) describieron en toros Brahman de la Orinoquía colombiana que las proteínas BSP del plasma seminal son más abundantes en época seca, y que los toros con mayor porcentaje de preñez comparten mapas proteicos similares. Fathoni et al. (2022) señalaron que la heredabilidad de rasgos reproductivos es generalmente $< 0,10$ y que ssGBLUP ofrece mayor precisión que los métodos multietapa. Segura Portocarrero et al. (2025) confirmaron en el trópico peruano que los factores agroclimáticos influyen significativamente en la eficiencia de la multiovulación, con variaciones entre épocas del año. Oloo et al. (2025) encontraron en Kenya correlación genética positiva entre resiliencia al calor y fertilidad ($h^2 \text{ AFC} = 0,17$; $\text{CI} = 0,06$; $\text{MY} = 0,35$).

Estrategias de adaptación y mitigación

McManus et al. (2026), evaluaron durante dos años, 48 vacas Gyr y Gyrolando en el Cerrado brasileño, encontrando que la sombra de *Eucalyptus urograndis* redujo consistentemente la temperatura corporal, la frecuencia respiratoria y el jadeo con THI > 74, con una precisión discriminante al 92 % de para diferenciar los sistema de manejo. Por su parte, Carvalho et al. (2020) confirmaron que los SSP con eucalipto mejoran el confort térmico independientemente de la orientación de las hileras, aunque el estrés persiste según la hora y la distancia a los árboles.

Adicionalmente, Bang et al. (2021) cuantificaron en 32 granjas de Vietnam que cada metro adicional en la longitud del alero reduce el THI en 1,42 unidades y la temperatura en 0,87 °C, y que los aspersores combinados con ventiladores disminuyen la temperatura en 1,3 °C. Dos Santos et al. (2022) propusieron el pastoreo nocturno y los índices ITSC e ITS como estrategias prácticas, dado que las vacas reducen espontáneamente el pastoreo cuando la irradiancia solar supera 550 W/m² (8:00–16:00 h). Elayadeth-Meethal et al. (2021) propusieron el gen ATP1A1 como marcador MAS para tolerancia al calor. Fathoni et al. (2022) y Oloo et al. (2025) convergieron en que la selección genómica ssGBLUP es la estrategia más precisa para mejorar fertilidad y resiliencia. Robson Mateus et al. (2025) añadieron que los modelos de inteligencia artificial permiten identificar redes complejas de variables adaptativas no detectables con métodos estadísticos convencionales.

Impacto documentado sobre la producción de leche

La producción de leche fue el parámetro con mayor número de artículos dedicados en el corpus (6 de 29). Mbuthia et al. (2021) con 131.380 registros test-day en Kenia identificaron el umbral THI ~69 para el inicio de la pérdida de producción. Niyonzima et al. (2022) cuantificaron -0,11 kg/unidad THI sobre el umbral en Ruanda. En Panamá, Araúz et al. (2020) documentaron con THI máximo de 86,59 producciones de 692 kg, 1.267 kg y 2.012 kg por lactación según la proporción de genes taurinos. En Suramérica, Carvalheira et al. (2021) confirmaron en 615 vacas Gyrolando en Brasil que la temperatura vaginal aumenta 0,05 °C por unidad de THI y que las vacas con > ¾ Holstein superan 39,1 °C durante las horas de mayor calor. Eslamizad et al. (2020) demostraron que las adaptaciones morfofuncionales en las papilas ruminales comprometen la absorción de AGV independientemente del consumo de alimento. Bang et al. (2022) validaron la termografía infrarroja como herramienta no invasiva de diagnóstico del estrés calórico en granjas de pequeños productores.

Impacto documentado sobre producción de carne y eficiencia alimentaria

Silva Neto et al. (2025) con 22.838 Nelore en Brasil encontraron interacción G×E significativa cuando el THI superó 76, con correlaciones genéticas < 0,80 para DMI y RFI entre diferentes gradientes ambientales. Neto et al. (2026) identificaron mediante GWAS 51 SNPs para RFI y 136 para DMI con genes candidatos específicos por gradiente de THI. Romo Valdez et al. (2022) documentaron relación directa THI-jadeo en bovinos de engorda. Zazueta et al. (2021) registraron mayor tasa de comportamientos agonistas con THI > 82. Velásquez-Mosquera y Navas-Panadero (2021) encontraron que los cruces Brahman × Romosinuano superaron a los grupos puros bajo THI > 82 en Colombia. Pereira Barsotti et al. (2024) confirmaron que los sistemas ICLF mejoran la eficiencia de conversión alimenticia y la productividad del agua.

Impacto documentado sobre los parámetros reproductivos

Naranjo-Gómez et al. (2021) revisaron los mecanismos moleculares por los cuales el calor compromete el embrión bovino, incluyendo sobreexpresión de HSP, alteración de genes de competencia del oocito y reducción de la actividad mitocondrial. Ratchamak et al. (2021) cuantificaron en Thai-Holstein superovuladas que los efectos negativos comienzan a THI 72 y son severos con THI > 77 (P < 0,05). Chacón et al. (2023) documentaron en la Orinoquía colombiana que el perfil proteico del plasma seminal varía estacionalmente con implicaciones sobre la fertilidad del hato. Segura Portocarrero et al. (2025) confirmaron impacto del THI sobre la eficiencia de la multiovulación en el trópico peruano. Fathoni et al. (2022) y Oloo et al. (2025) respaldaron ssGBLUP y la selección por resiliencia como estrategias genómicas para mejorar la fertilidad bajo estrés calórico.

Estrategias de mitigación documentadas

Los artículos del corpus documentaron estrategias de mitigación en tres categorías principales. En manejo ambiental: McManus et al. (2026) demostraron que la sombra arbórea (SSP) redujo temperatura, frecuencia respiratoria y jadeo en bovinos con > 92 % de precisión discriminante; Dos Santos et al. (2022) propusieron el pastoreo nocturno y los índices ITSC e ITS como herramientas más precisas que el THI para el manejo en pastoreo tropical. En diseño de instalaciones: Bang et al. (2021) cuantificaron que +1 m en la altura del alero reduce el THI en 1,42 unidades; Carvalho et al. (2020) confirmaron que los SSP con eucalipto mejoran el microclima independientemente de la orientación de

las hileras; Pereira Barsotti et al. (2024) confirmaron que los sistemas ICLF mejoran la eficiencia productiva bajo calor. En mejoramiento genético: Elayadeth-Meethal et al. (2021) propusieron el marcador MAS ATP1A1; Fathoni et al. (2022) y Oloo et al. (2025) recomendaron ssGBLUP para rasgos reproductivos de baja heredabilidad; Robson Mateus et al. (2025) validaron los modelos de IA como herramientas para identificar fenotipos adaptativos.

Discusión

Respuesta sistémica al estrés calórico: jerarquía fisiológica

Los resultados de los 29 artículos demuestran que el estrés calórico actúa sobre el bovino de doble propósito como un estresor sistémico con respuestas escalonadas: el organismo prioriza la supervivencia sobre la producción, sacrificando progresivamente la síntesis de leche, la eficiencia alimentaria y la función reproductiva para mantener la homeostasis térmica. Velayudhan et al. (2022) documentaron la afectación del perfil de expresión génica como correlato molecular de esta respuesta sistémica. Eslamizad et al. (2020) añadieron que las adaptaciones ruminales comprometen la absorción de AGV incluso controlando el consumo de alimento, lo que invalida la estrategia de suplementación alimentaria como respuesta única. Elayadeth-Meethal et al. (2021) identificaron el gen ATP1A1 como diferenciador molecular entre razas adaptadas y susceptibles al calor. Robson Mateus et al. (2025) integraron estos hallazgos mediante modelos de IA, confirmando que la adaptación al calor es multivariada y sistémica. Thornton et al. (2021), Carvajal et al. (2021) y Thornton et al. (2022) advierten que esta situación se agravará exponencialmente antes de 2050.

Producción de leche: dilema genético del doble propósito

Mbuthia et al. (2021), Niyonzima et al. (2022), Araúz et al. (2020) y Carvalheira et al. (2021) coinciden en identificar el dilema central: a mayor proporción de genes *Bos taurus*, mayor potencial lechero, pero también mayor susceptibilidad al calor. El umbral de THI 69 documentado por Mbuthia et al. (2021) —más bajo que el reportado para Holstein en climas templados— señala que el cruzamiento con razas especializadas en el trópico bajo tiene un costo termorregulatorio que se manifiesta antes de lo que los modelos desarrollados en climas frescos predicen. Correa-Calderón et al. (2022) señalaron que la pérdida sobre la síntesis mamaria directa persiste incluso controlando el consumo, mientras que Bang et al. (2022) propusieron la termografía infrarroja como herramienta diagnóstica no invasiva aplicable en campo para monitorear el deterioro.

Reproducción y carne: impacto multiplicador y soluciones genómicas

La vulnerabilidad reproductiva documentada por Naranjo-Gómez et al. (2021) y Ratchamak et al. (2021) desde THI 72 tiene consecuencias multiplicadoras sobre todo el sistema productivo. El

hallazgo de Chacón et al. (2023) en la Orinoquía colombiana —variación estacional del perfil proteico seminal de toros Brahman— introduce una variable no considerada en los sistemas de manejo reproductivo convencionales: la época del año debe ser una variable de planificación reproductiva explícita. Oloo et al. (2025) aportan la perspectiva genómica: la correlación positiva entre resiliencia al calor y fertilidad significa que seleccionar animales tolerantes al calor también mejora la reproducción. Fathoni et al. (2022) y Segura Portocarrero et al. (2025) confirmaron que los factores agroclimáticos limitan la eficiencia de las biotecnologías reproductivas en el trópico. Silva Neto et al. (2025) y Neto et al. (2026) demuestran que la interacción G×E bajo THI > 76 redefine los valores genéticos para eficiencia alimentaria, exigiendo que los programas de selección para el trópico bajo sean calculados y validados bajo condiciones térmicas equivalentes.

Estrategias de mitigación: hacia un manejo integrado

Los artículos del corpus demuestran que ninguna estrategia individual es suficiente y que la mitigación eficaz requiere combinar manejo ambiental, diseño de instalaciones y mejoramiento genético. McManus et al. (2026) y Carvalho et al. (2020) aportan la evidencia más sólida sobre los SSP: la sombra arbórea reduce la carga calórica del animal de forma cuantificable y sostenida. Bang et al. (2021) proporcionan parámetros de diseño de instalaciones directamente aplicables a pequeños productores colombianos. Dos Santos et al. (2022) identificaron el pastoreo nocturno como estrategia de bajo costo. Pereira Barsotti et al. (2024) confirman que los sistemas ICLF mejoran simultáneamente el bienestar, la eficiencia de conversión y la productividad del agua. Elayadeth-Meethal et al. (2021), Fathoni et al. (2022) y Oloo et al. (2025) añaden las herramientas de selección genómica que permitirán escalar estas soluciones al nivel poblacional. Velásquez-Mosquera y Navas-Panadero (2021) demuestran en condiciones reales del trópico bajo colombiano que las razas criollas —particularmente el Romosinuano— son una alternativa genética viable.

"La interacción entre el cambio climático y la ganadería en el trópico bajo crea un círculo vicioso: el aumento de la temperatura global eleva el estrés térmico en el ganado, lo cual reduce la eficiencia de conversión alimenticia, resultando en una mayor emisión de metano entérico por unidad de producto (leche o carne) generado."

Limitaciones

Esta revisión tiene limitaciones que deben tenerse en cuenta al interpretar sus conclusiones. La mayoría de los artículos seleccionados provienen de Brasil y África subsahariana, y solo cuatro incluyen datos directos de Colombia —García et al. (2020), Velásquez-Mosquera y Navas-Panadero (2021), Chacón et al. (2023) y Sandoval et al. (2023)— lo que limita la extrapolación directa de los umbrales THI a las condiciones específicas del país, donde la variabilidad altitudinal, la radiación solar ecuatorial y las razas criollas locales introducen factores que los estudios internacionales no capturan. Adicionalmente, la diversidad metodológica entre los 29 artículos —distintos rangos de THI, razas evaluadas, condiciones de manejo y tipos de producción— dificulta la comparación cuantitativa directa entre estudios. Estas brechas evidencian la necesidad urgente de investigación generada directamente en el trópico bajo colombiano con sus razas y condiciones propias.

Conclusiones

1. El estrés calórico en el trópico bajo es una condición crónica y multifactorial que afecta negativamente todos los parámetros productivos del sistema ganadero doble propósito. El THI constituye la herramienta de cuantificación más validada científicamente, con umbrales productivos documentados a partir de THI 69 para leche, THI 72 para reproducción y THI 76 para eficiencia alimentaria en carne; umbrales que el trópico bajo colombiano supera de manera habitual y crónica, según los registros de THI > 82 documentados en el Piedemonte llanero por Velásquez-Mosquera y Navas-Panadero (2021).

2. La producción de leche es el parámetro más inmediatamente afectado por el estrés calórico, con pérdidas progresivas a partir de THI 69 que se amplifican en razas con mayor proporción de genes taurinos. La incorporación de razas *Bos taurus* especializadas en leche incrementa el potencial productivo pero reduce la termorregulación; por tanto, el equilibrio entre potencial lechero y tolerancia al calor debe ser un criterio central en los programas de cruzamiento para el doble propósito en el trópico bajo colombiano.

3. La eficiencia alimentaria y la ganancia de peso en bovinos de carne se deterioran significativamente cuando el THI supera 76, asociados a reducción del consumo voluntario de alimento, aumento del jadeo, modificaciones en la conducta de pastoreo e interacciones genotipo-ambiente que anulan el efecto de la selección genética realizada en ambientes frescos. Las razas criollas colombianas como el Romosinuano demostraron mejor comportamiento productivo que los grupos Brahman puros bajo condiciones de estrés calórico severo, evidenciando el valor estratégico de la diversidad genética local.

4. La reproducción es el parámetro productivo más sensible al estrés calórico, con efectos negativos documentados sobre la calidad ovocitaria, la producción de embriones transferibles, la implantación, la fertilidad de los toros y la función luteal, que comienzan a partir de THI 72 y se intensifican progresivamente. La variabilidad climática estacional en el trópico bajo colombiano —documentada en toros Brahman de la Orinoquía— modifica el perfil del plasma seminal con implicaciones para el manejo reproductivo de los hatos, lo que exige estrategias que consideren la época climática como variable de planificación.

5. Los sistemas silvopastoriles constituyen la estrategia de mitigación del estrés calórico con mayor respaldo científico en condiciones de trópico. La sombra arbórea reduce de forma cuantificable la temperatura corporal, la frecuencia respiratoria y el puntaje de jadeo de los bovinos, mejorando simultáneamente el comportamiento de pastoreo, la eficiencia alimentaria y la producción de leche. En Colombia, los SSP han demostrado beneficios económico-ambientales bajo la perspectiva de servicios ecosistémicos, posicionándolos como herramienta de adaptación climática estratégica para la ganadería de doble propósito del trópico bajo.

6. El mejoramiento genético orientado a la tolerancia al calor —mediante la inclusión de razas Bos indicus adaptadas, razas criollas colombianas y el uso de herramientas de selección genómica (ssGBLUP, selección asistida por marcadores como ATP1A1)— representa la estrategia de mayor impacto a mediano y largo plazo para sostener la productividad ganadera doble propósito en el trópico bajo ante el escenario de cambio climático proyectado para Colombia y la región tropical latinoamericana.

Bibliografía

- Araúz, E. E., Araúz, E. E., & Montezuma, Á. (2020). Perfil de la curva de lactación y producción láctea comercial en vacas cebuínas y cruzadas en fincas lecheras con baja tecnología en el trópico. *Revista investigaciones agropecuarias*, 2(2), 49–68. <https://doi.org/10.48204/j.ia.v2n2a4>
- Bang, N. N., Gaughan, J. B., Hayes, B. J., Lyons, R. E., Chanh, N. V., Trach, N. X., Khang, D. N., & McNeill, D. M. (2021). Characteristics of cowsheds in Vietnamese smallholder dairy farms and their associations with microclimate: A preliminary study. *Animals*, 11(2), 351. <https://doi.org/10.3390/ani11020351>
- Bang, N. N., Gaughan, J. B., Hayes, B. J., Lyons, R. E., & McNeill, D. M. (2022). Application of infrared thermal technology to assess the level of heat stress and milk yield reduction of cows in tropical smallholder dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 105(10), 8454–8469. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21343>
- Carvajal, M. A., Alaniz, A. J., Gutiérrez-Gómez, C., Vergara, P. M., Sejian, V., & Bozinovic, F. (2021). Increasing importance of heat stress for cattle farming under future global climate scenarios. *Science of The Total Environment*, 801, 149661. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149661>
- Carvalho, L. de R., Wenceslau, R. R., Ribeiro, L. dos S., de Carvalho, B. C., Borges, Á. M., & Camargo, L. S. de A. (2021). Daily vaginal temperature in Girolando cows from three different genetic composition under natural heat stress. *Translational Animal Science*, 5(3), txab138. <https://doi.org/10.1093/tas/txab138>
- Carvalho, R. P. de, Heid, D. M., Davide, L. M. C., Piletti, L. M. M. da S., Jesus, F. L. F. de, & Viegas Neto, A. L. (2020). Microclimate and thermal comfort indices in silvopastoral systems under different planting directions and seasons. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24(4), 266–273. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n4p266-273>
- Chacón, L. J., Yepes, G. D., Cardozo, J., Rueda, F., Castillo, V., Torres, A., Martins, J., & Ardila, A. (2023). Seminal plasma proteins associated with the fertility of Brahman bulls in the Colombian low tropics. *Tropical Life Sciences Research*, 34(3), 259–277. <https://doi.org/10.21315/tlsr2023.34.3.14>
- Correa-Calderón, A., Avendaño-Reyes, L., López-Baca, M. Á., & Macías-Cruz, U. (2022). Estrés por calor en ganado lechero con énfasis en la producción de leche y los hábitos de consumo de

alimento y agua. Revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 13(2), 488–509. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v13i2.5832>

dos Santos, S. G. C. G., Saraiva, E. P., Gonzaga Neto, S., Maia, M. I. L., Lees, A. M., Sejian, V., Maia, A. S. C., de Medeiros, G. R., & Fonsêca, V. de F. C. (2022). Heat tolerance, thermal equilibrium and environmental management strategies for dairy cows living in intertropical regions. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 988775. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.988775>

Elayadeth-Meethal, M., Thazhathu Veetil, A., Asaf, M., Pramod, S., Maloney, S. K., Martin, G. B., Rivero, M. J., Sejian, V., Naseef, P. P., Kuruniyan, M. S., & Lee, M. R. F. (2021). Comparative expression profiling and sequence characterization of ATP1A1 gene associated with heat tolerance in tropically adapted cattle. *Animals*, 11(8), 2368. <https://doi.org/10.3390/ani11082368>

Eslamizad, M., Albrecht, D., & Kuhla, B. (2020). The effect of chronic, mild heat stress on metabolic changes of nutrition and adaptations in rumen papillae of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 103(9), 8601–8614. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18417>

Fathoni, A., Boonkum, W., Chankitisakul, V., & Duangjinda, M. (2022). An appropriate genetic approach for improving reproductive traits in crossbred Thai–Holstein cattle under heat stress conditions. *Veterinary Sciences*, 9(4), 163. <https://doi.org/10.3390/vetsci9040163>

García, Z. A. C., Gaona, R. C., & Díaz, H. F. (2020). Design and testing of a sweat meter for the cutaneous evaporation determination in cattle. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, 8(3), 223–228. <https://doi.org/10.31893/jabb.20029>

McManus, C., Pimentel, F., Junqueira, V. S., Balbino, L. C., Cordeiro, L. A. M., Bernal, F., Peripolli, V., & Ferreira, I. C. (2026). Shade matters: Heat stress alleviation in Gyr and Girolando cows through silvopastoral management in tropical conditions. *International Journal of Biometeorology*, 70(1), 27. <https://doi.org/10.1007/s00484-025-03063-7>

Mbuthia, J. M., Mayer, M., & Reinsch, N. (2021). Modeling heat stress effects on dairy cattle milk production in a tropical environment using test-day records and random regression models. *Animal*, 15(8), 100222. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100222>

Naranjo-Gómez, J. S., Uribe-García, H. F., Herrera-Sánchez, M. P., Lozano-Villegas, K. J., Rodríguez-Hernández, R., & Rondón-Barragán, I. S. (2021). Heat stress on cattle embryo: Gene regulation and adaptation. *Heliyon*, 7(3), e06570. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06570>

- Neto, J. B. S., Brito, L. F., Mota, L. F. M., Rodrigues, G. R. D., & Baldi, F. (2026). Modeling genotype-by-environment interactions across climatic conditions reveals environment-specific genomic regions and candidate genes underlying feed efficiency traits in tropical beef cattle. *Scientific Reports*, 16, 643. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-33952-1>
- Niyonzima, Y. B., Strandberg, E., Hirwa, C. D., Manzi, M., Ntawubizi, M., & Rydhmer, L. (2022). The effect of high temperature and humidity on milk yield in Ankole and crossbred cows. *Tropical Animal Health and Production*, 54(2), 85. <https://doi.org/10.1007/s11250-022-03092-z>
- Oloo, R. D., Mrode, R., Ekine-Dzivenu, C. C., Ojango, J. M. K., Bennewitz, J., Gebreyohanes, G., Okeyo, A. M., & Chagunda, M. G. G. (2025). Genetic relationships among resilience, fertility and milk production traits in crossbred dairy cows performing in Sub-Saharan Africa. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, 142(6), 630–642. <https://doi.org/10.1111/jbg.12933>
- Pereira Barsotti, M., de Almeida, R. G., Motta Macedo, M. C., Zawada, P., Werner, J., & Dickhoefer, U. (2024). Behavioural responses of beef cattle to different grazing systems and the influence of these responses on water productivity of livestock in a tropical savannah. *Animal*, 18(4), 101117. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101117>
- Thornton, P., Nelson, G., Mayberry, D., & Herrero, M. (2022). Impacts of heat stress on global cattle production during the 21st century: A modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 6(3), e192–e201. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00002-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00002-X)
- Ratchamak, R., Ratsiri, T., Chumchai, R., Boonkum, W., & Chankitisakul, V. (2021). Relationship of the temperature-humidity index (THI) with ovarian responses and embryo production in superovulated Thai-Holstein crossbreds under tropical climate conditions. *Veterinary Sciences*, 8(11), 270. <https://doi.org/10.3390/vetsci8110270>
- Robson Mateus, Á. M., & Fávelo, L. P. (2025). Intelligent multi-modeling reveals biological relationships and adaptive phenotypes for dairy cow adaptation to climate change. *Smart Agricultural Technology*, 12, 101128. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101128>
- Romo Valdez, A. M., Loera, J. J. P., Estrada, J. D. U., Angulo, A. E., Pérez, B. I. C., & Rincón, F. G. R. (2022). Frecuencia y puntaje de jadeo en bovinos productores de carne en finalización intensiva durante el verano. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 13(2), 559–572. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v13i2.5977>

- Sandoval, D. F., Enciso Valencia, K. J., Sotelo Cabrera, M. E., & Stefan, B. (2023). Economic-environmental assessment of silvo-pastoral systems in Colombia: An ecosystem service perspective. *Heliyon*, 9(8), e19082. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19082>
- Segura Portocarrero, G. T., Murga Valderrama, N. L., Lopez Lapa, R. M., Saucedo Uriarte, J. A., Gongora Bardales, D. J., Frias Torres, H., Poclín Rojas, A. Y., Depaz Hizo, B., Vasquez Tarrillo, R. W., Heredia Vilchez, L. A., & Ampuero Trigoso, G. (2025). Influence of agroclimatic factors on the efficiency of multi-ovulation in cattle in the Peruvian tropics. *Frontiers in Veterinary Science*, 12, 1565265. <https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1565265>
- Silva Neto, J. B., Brito, L. F., Mota, L. F. M., Silva, M. R. G., Rodrigues, G. R. D., & Baldi, F. (2025). Exploring the impact of heat stress on feed efficiency in tropical beef cattle using genomic reaction norm models. *Animal*, 19(9), 101612. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2025.101612>
- Thornton, P., Nelson, G., Mayberry, D., & Herrero, M. (2021). Increases in extreme heat stress in domesticated livestock species during the twenty-first century. *Global Change Biology*, 27(22), 5762–5772. <https://doi.org/10.1111/gcb.15825>
- Velayudhan, S. M., Brügemann, K., Alam, S., Yin, T., Devaraj, C., Sejian, V., Schlecht, E., & König, S. (2022). Molecular, physiological and hematological responses of crossbred dairy cattle in a tropical savanna climate. *Biology*, 12(1), 26. <https://doi.org/10.3390/biology12010026>
- Velásquez-Mosquera, J. C., & Navas-Panadero, A. (2021). Evaluación productiva de novillos cebú cruzados con razas criollas BON y Romo en el Piedemonte llanero. *Revista de Medicina Veterinaria*, (42), 67–76. <https://doi.org/10.19052/mv.voll.iss42.8>
- Zazueta, A. C., Ríos, F. G., Castro, B. I., Estrada, A., & Portillo, J. J. (2021). Environmental effect and pen design on agonist behaviour of beef cattle in feedlot. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(1). <https://doi.org/10.56369/tsaes.3723>