



ISSN 2215-2202

# AGRONOMÍA COSTARRICENSE

## REVISTA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost>



### Artículo científico

## Diseño, implementación y evaluación de un sistema de enfriamiento evaporativo para vacas en una lechería comercial \*

Francisco Baradín-Sandí<sup>1</sup>, Geovanni Carmona-Villalobos<sup>2</sup>, Jorge Alberto Elizondo-Salazar<sup>3/\*\*</sup>

\*Este trabajo formó parte del proyecto de investigación 737-B5-188 inscrito en la Vicerrectoría de Investigación y del proyecto de acción social ED-2746 inscrito en la Vicerrectoría de Acción Social de la Universidad de Costa Rica.

\*\* Autor para correspondencia. Correo electrónico: [jorge.elizondosalazar@ucr.ac.cr](mailto:jorge.elizondosalazar@ucr.ac.cr)

<sup>1</sup>Equifax, Ingeniero en Biosistemas/Analista de datos, Costa Rica. 

<sup>2</sup>Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Biosistemas, San José, Costa Rica. 

<sup>3</sup>Universidad de Costa Rica, Facultad de Ciencias Agroalimentarias, Estación Experimental Alfredo Volio Mata, Cartago, Costa Rica. 

DOI: <https://doi.org/10.15517/2aczw43>

Recibido el 02 de setiembre del 2025; Aceptado el 15 de diciembre del 2025

### Resumen

**Introducción.** El estrés por calor en el ganado lechero es una problemática creciente, especialmente en climas tropicales como el de Costa Rica. Este fenómeno impacta negativamente la producción de leche, la salud animal y la eficiencia reproductiva. Por ello, se vuelve crucial implementar estrategias de mitigación que mejoren el bienestar del ganado y la rentabilidad de las fincas. **Objetivo.** Evaluar los efectos de un sistema de enfriamiento evaporativo (SEE) sobre el bienestar, la productividad y el rendimiento reproductivo de vacas lecheras de raza Jersey. **Materiales y métodos.** El experimento se llevó a cabo durante tres meses de época seca, dividiendo el hato en dos bloques homogéneos: uno expuesto al SEE y otro no expuesto, utilizado como control. Se midieron variables ambientales (temperatura y humedad), fisiológicas (temperatura superficial), productivas (rendimiento de leche y sus componentes), reproductivas (días abiertos y servicios por concepción) y de salud (conteo de células somáticas). Además, se realizó un análisis financiero para evaluar la viabilidad económica del sistema. **Resultados.** Los resultados mostraron una reducción significativa del Índice de Temperatura y Humedad (ITH) en la zona bajo el SEE, con un descenso promedio de 2,91 puntos, y una disminución de hasta 3,97 °C en la temperatura superficial de las vacas expuestas. Sin embargo, no se observaron mejoras significativas en la producción de leche ni en los parámetros reproductivos. Tampoco hubo aumento en el conteo de células somáticas. Desde el punto de vista financiero, la inversión no fue rentable bajo las condiciones actuales.

**Conclusión.** El sistema de enfriamiento evaporativo redujo significativamente la temperatura superficial de las vacas, sin afectar negativamente la salud de la ubre, pero no generó mejoras en la producción de leche ni en indicadores reproductivos bajo las condiciones ambientales del estudio.

**Palabras clave:** estrés calórico; producción lechera; bienestar animal; índice de temperatura-humedad; raza Jersey.

### *Scientific Article*

#### **Abstract**

#### **Design, implementation, and evaluation of an evaporative cooling system for dairy cows in a commercial farm**

**Introduction.** Heat stress in dairy cattle is a growing problem, especially in tropical climates like in Costa Rica. This phenomenon negatively impacts milk production, animal health, and reproductive efficiency. Therefore, it is crucial to implement mitigation strategies that improve cattle welfare and farm profitability.

**Objective.** To evaluate the effects of an evaporative cooling system (ECS) on the welfare, productivity, and reproductive performance of Jersey cows. **Materials and methods.** Over a three-month period during the dry season, the herd was divided into two homogeneous blocks: one exposed to the ECS and the other serving as a control. Variables such as temperature, humidity, surface body temperature, milk yield and composition, reproductive performance, and somatic cell count were measured. Additionally, a financial analysis was conducted to assess the economic feasibility of the system. **Results.** The results showed a significant reduction in the Temperature-Humidity Index (THI) in the area under the ECS, with an average decrease of 2.91 points, and a drop of up to 3.97 °C in surface body temperature of exposed cows. However, no significant improvements were observed in milk production or reproductive parameters. Somatic cell counts also did not increase. From a financial perspective, the investment was not profitable under the current conditions. **Conclusion.** The evaporative cooling system significantly reduced the surface temperature of cows without negatively affecting udder health, but it did not improve milk production or reproductive indicators under the environmental conditions of the study.

**Keywords:** heat stress; milk production; animal welfare; temperature-humidity index; Jersey breed.

## Introducción

La industria lechera y los animales de producción que en ella participan desempeñan un papel fundamental en la sociedad, al contribuir en múltiples áreas como la transformación de subproductos en proteína de alto valor biológico para consumo humano, el aprovechamiento de tierras marginales, la mejora de la fertilidad de los suelos y, en algunos contextos, como un indicador del estatus socioeconómico de las comunidades rurales (Felis et al., 2025; Gil et al., 2024; van Zanten et al., 2016).

En Costa Rica, la producción lechera constituye uno de los sistemas agrícolas de mayor relevancia dentro del sector pecuario, al ocupar la mayor proporción del área destinada a actividades agropecuarias. Esta actividad no solo tiene un peso significativo en términos productivos, sino que también desempeña un papel fundamental en la economía y el tejido social de las zonas rurales. De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2015), el subsector lechero comprende aproximadamente 13 236 unidades productivas, con un inventario de 327 130 bovinos especializados y 409 880 animales de doble propósito. La producción diaria estimada alcanza 1,61 millones de litros de leche, destinados en su mayoría al consumo local, lo que posiciona al país con el consumo per cápita de leche más alto de la región centroamericana. Sin embargo, este elevado nivel de consumo, sumado a la compleja coyuntura económica global, ha impulsado a la industria lechera a incrementar su producción, al mismo tiempo que enfrenta crecientes presiones ambientales derivadas del cambio climático.

Ante este panorama, se ha promovido la adopción de diversas tecnologías orientadas a mejorar la eficiencia y productividad de los sistemas lecheros. Entre estas, se destacan el mejoramiento genético del hato, la prevención y control de enfermedades, la optimización de la dieta y la implementación de tecnologías que favorezcan el aumento de la producción sin comprometer el bienestar animal (Oliveira et al., 2025; Ruiz-Jaramillo et al., 2019). Como resultado de estas dinámicas, se prevé que el ganado lechero, tanto en el presente como en el futuro, sea sometido a esquemas de producción más exigentes, en contextos climáticos cada vez más extremos. Esta combinación de altas exigencias productivas y condiciones ambientales adversas representa un desafío significativo para los animales, ya que puede provocar un aumento en su temperatura corporal, lo que a su vez afecta negativamente su bienestar, salud, eficiencia reproductiva y producción láctea (DeShazer et al., 2013).

Para mitigar los efectos del estrés térmico en los animales, las fincas lecheras han comenzado a implementar diversas estrategias centradas en la modificación del ambiente inmediato. Estas pueden agruparse en dos categorías principales: (1) aquellas orientadas a humedecer directamente a las vacas o el aire circundante y (2) aquellas que buscan incrementar la tasa de intercambio de calor convectivo, principalmente mediante el aumento de la velocidad del aire en el entorno de los animales.

El estudio y la evaluación de estas estrategias constituyen un punto de partida esencial para mejorar la resiliencia del sector lechero ante el cambio climático, además de representar un avance hacia sistemas de producción más eficientes y rentables. Asimismo, la implementación de tecnologías que reduzcan el estrés calórico puede abrir nuevas oportunidades de producción en zonas previamente consideradas poco aptas para la actividad lechera debido a sus condiciones climáticas, promoviendo así el desarrollo regional. Por esta razón, el objetivo del estudio fue diseñar un sistema de enfriamiento evaporativo y evaluar la efectividad de su implementación en la reducción del estrés térmico en ganado lechero de la Estación Experimental Alfredo Volio Mata.

### **Materiales y métodos**

El experimento se realizó entre enero y mayo del 2020 en el módulo lechero de la Estación Experimental Alfredo Volio Mata (EEAVM) de la Universidad de Costa Rica, ubicada en San Rafael, La Unión, Cartago (09°54'31.0"N, 83°57'17.2"O), a 1 592 msnm. La zona presenta una precipitación media anual de 1 500 mm, concentrada, principalmente, entre mayo y noviembre, con una humedad relativa promedio del 84% y temperaturas que oscilan entre 19,3 y 23,0 °C (Elizondo-Salazar, 2015; Ferrufino-Suárez et al., 2022).

### **Diseño experimental**

El estudio se estructuró en tres componentes principales: 1) diseño e instalación del sistema de enfriamiento evaporativo (SEE) en la sala de espera de la lechería, 2) evaluación del impacto del SEE sobre la producción de leche y el rendimiento reproductivo, 3) análisis financiero de la implementación del sistema en condiciones reales de finca.

Se seleccionaron 32 vacas de la raza Jersey puras, que se dividieron en dos bloques homogéneos (A y B) de 16 animales cada uno. La asignación se realizó con base en días en lactancia ( $A = 170,9 \pm 95,1$ ;  $B = 170,6 \pm 90,5$ ), producción diaria de leche ( $A = 16,4 \pm 2,7$  kg;  $B = 17,6 \pm 3,6$  kg), número de partos ( $A = 2,6 \pm 1,5$ ;  $B = 2,6 \pm 1,0$ ) y edad ( $A = 5,6 \pm 1,9$  años;  $B = 5,7 \pm 1,4$  años).

El ensayo se desarrolló en tres etapas de un mes cada una: Etapa 1: el Bloque A fue expuesto al SEE y el Bloque B se mantuvo sin tratamiento; Etapa 2: ambos bloques fueron expuestos al sistema; Etapa 3: se invirtieron los tratamientos, exponiendo al Bloque B al SEE y al Bloque A sin tratamiento.

Durante todo el periodo, ambos grupos recibieron una alimentación homogénea, basada en pasturas y suplementos nutricionales iguales.

### **Diseño del sistema de enfriamiento evaporativo**

El SEE fue instalado en la sala de espera de la lechería, para ello se consideraron la disposición del espacio, el caudal de descarga de los aspersores, la altura de funcionamiento, la distancia entre los componentes y su interacción con el flujo de aire generado por los ventiladores. Las especificaciones técnicas del sistema de ventilación, del sistema de aspersión y de la sala de espera, incluyendo modelo, caudal de aire, características de los aspersores, dimensiones del área y disposición especial, se describen en detalle en la **Tabla 1**.

La uniformidad de aplicación del agua fue evaluada siguiendo la metodología propuesta por Zúñiga-Martínez (2004), mediante la disposición de recipientes colectores distribuidos en una cuadrícula regular de 1 m x 1 m sobre el área de cobertura del SEE. El sistema operó durante una hora continua y los volúmenes recolectados fueron posteriormente pesados para su análisis en el software Catch 3D, a partir del cual se calculó el coeficiente de uniformidad del riego. La velocidad del viento generada por el sistema de ventilación fue medida con un anemómetro digital (Prova AVM-01).

### **Evaluación del desempeño del sistema**

Para validar el efecto del SEE, se realizaron mediciones ambientales y de respuesta térmica superficial en la sala de espera, con el fin de evaluar su impacto sobre el microclima y la temperatura corporal externa de las vacas.

#### **1. Temperatura superficial de las vacas:**

La temperatura superficial se midió antes y después del paso de los animales por la sala de espera, utilizando un termómetro infrarrojo (Fluke-62 MAX ESPR). Las lecturas se realizaron a una distancia no mayor a 30 cm de la superficie corporal, en las regiones de la cadera, la escápula y la base de la cola. La emisividad del equipo se ajustó a 0,95, conforme a lo recomendado por Poikalainen et al., (2012). La temperatura superficial individual se definió como el promedio de las mediciones obtenidas en estas tres áreas, siguiendo criterios reportados previamente (Echeverri-Echeverri et al., 2018; Orbach, 2019).

Con el fin de evitar sesgos asociados a la presencia de agua sobre la superficie corporal, las mediciones posteriores al uso del sistema de enfriamiento evaporativo se realizaron tras permitir que las vacas secan de forma natural el exceso de humedad superficial antes de la toma de datos, lo que minimizó el sesgo generado por una capa de agua sobre la piel. Esto es importante porque la radiación infrarroja detectada por termómetros infrarrojos depende de las propiedades de la superficie medida, y recubrimientos o sustancias aplicadas pueden alterar las lecturas de temperatura superficial al modificar la emisividad efectiva del objeto (Bernard et al., 2013).

Las mediciones se realizaron diariamente durante un mes. Adicionalmente, se capturaron imágenes térmicas mediante una cámara infrarroja (Flir E60) con el objetivo de corroborar los valores registrados por el termómetro puntual.

## **2. Índice de Temperatura-Humedad (ITH):**

El ITH se evaluó en la sala de espera por medio de dataloggers de temperatura y humedad relativa (HOBO MX1102A y HOBO MX2300), instalados a aproximadamente 1 m por debajo del nivel del techo, con el fin de evitar el contacto directo con los animales. Los dispositivos registraron datos cada minuto, en el intervalo comprendido entre la 1:00 p. m. y las 5:00 p. m., durante un periodo continuo de tres meses. El ITH se calculó mediante el uso de la fórmula de Kelly y Bond adaptada a grados Celsius (NRC, 1971):

$$ITH = 0,8 \cdot T + RH \cdot (T - 14,4) + 46,4$$

donde  $T$  es la temperatura en °C y  $HR$  la humedad relativa en decimal.

Para el análisis comparativo, se consideraron áreas bajo la influencia directa del sistema de enfriamiento evaporativo (ITH-SEE) y áreas adyacentes con sombra artificial sin enfriamiento activo (ITH-Ambiente). Las comparaciones se realizaron con datos correspondientes a un periodo de 30 minutos durante la permanencia de los bloques experimentales en cada condición.

### **Análisis estadístico**

Se aplicó estadística descriptiva a todas las variables evaluadas. Las comparaciones de temperatura superficial se realizaron entre mediciones obtenidas en los mismos animales antes y después de su paso por la sala de espera, por lo que se utilizó una prueba  $t$  de Student para muestras pareadas. En todos los análisis, se consideró un nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$ .

Para el análisis del ITH, se compararon dos condiciones ambientales: áreas bajo la influencia directa del sistema de enfriamiento evaporativo (ITH-SEE) y áreas adyacentes con sombra artificial sin enfriamiento activo (ITH-Ambiente). Las diferencias entre ambas condiciones se evaluaron mediante una prueba  $t$  de Student para muestras independientes, utilizando el mismo nivel de significancia ( $\alpha = 0,05$ ).

### **Evaluación del efecto del sistema de enfriamiento evaporativo sobre la producción y calidad de la leche y el rendimiento reproductivo**

El efecto del SEE se evaluó mediante indicadores productivos y reproductivos, incluyendo la producción diaria de leche, la composición de la leche y el rendimiento reproductivo, durante todo el periodo experimental.

La producción individual diaria de leche fue registrada automáticamente en cada ordeño (mañana y tarde) mediante el sistema SCR DataFlow II (SCR Engineers Ltd., Netanya, Israel), instalado en la EEAVM. Adicionalmente, se recolectaron muestras de leche semanalmente, las cuales fueron analizadas por medio de un analizador Milkoscan Minor (Foss Electric A/S, Hillerød, Dinamarca) para determinar el contenido de grasa y proteína.

Debido a que las mismas vacas fueron expuestas de forma secuencial a ambos tratamientos (con y sin SEE) a lo largo del periodo experimental, los datos productivos y de composición de la leche se analizaron mediante un modelo lineal mixto para medidas repetidas, para ello se consideraron el tratamiento y el periodo experimental como efectos fijos y la vaca como efecto aleatorio. El análisis se realizó utilizando el procedimiento MIXED del programa SAS (SAS Institute, 2018).

Para descartar un posible incremento en la incidencia de mastitis asociado al uso del SEE, se realizaron conteos semanales de células somáticas (CCS) durante el primer mes del estudio. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de la Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos, y los valores de CCS se transformaron logarítmicamente ( $\log_{10}$ ) previo al análisis, debido a su distribución no normal (Bobbo et al., 2021).

El rendimiento reproductivo se evaluó mediante el número de servicios por concepción y los días abiertos. Dado que estos parámetros se compararon dentro de los mismos animales bajo ambas condiciones experimentales, se utilizó una prueba *t* de Student para muestras pareadas, considerando un nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$ .

### **Análisis de costos**

Con el objetivo de determinar la viabilidad económica del SEE en condiciones de finca, se registraron todos los costos asociados a la inversión, operación y mantenimiento durante el periodo experimental. El análisis consideró escenarios representativos de una finca comercial costarricense, excluyendo beneficios institucionales propios de la EEAVM, como exenciones fiscales o mano de obra subsidiada. Los costos se clasificaron en: inversión inicial, correspondiente a la adquisición e instalación de todos los componentes del SEE; gastos operativos anuales, asociados al uso del sistema durante la estación seca, estimada en 4 meses al año; costos de mantenimiento anual, que incluyen la revisión y limpieza de aspersores y filtros, mantenimiento de ventiladores y ajustes en la red de tuberías.

## Resultados y discusión

### Instalación y diseño del sistema de enfriamiento evaporativo

El SEE instalado en la EEAVM estuvo compuesto por dos subsistemas principales: ventilación mecánica y aspersión de agua. El SEE fue ubicado en la sala de espera de la lechería, un área techada de  $10,5 \times 9,85$  m, con muros laterales de 1,5 m de altura, piso con alfombra antideslizante y sistema de drenaje. Un área posterior (patio de salida) con características similares sirvió como control para comparar condiciones sin enfriamiento.

### Sistema de ventilación

Se utilizaron dos ventiladores GEA Farm Technologies (modelo 5131-5200-020, Bönen, Alemania; 220 V, 60 Hz; **Tabla 1**), cada uno con tres aspas de 1,32 m de diámetro, motor eléctrico monofásico (1 Ph) de 1,5 caballos de fuerza (HP) y capacidad para mover  $26\,700\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$  de aire. Los ventiladores fueron instalados a 2,0 m de altura sobre el piso, separados entre sí 4,9 m y con un ángulo de inclinación de  $30^\circ$ , ubicados a 2,0 m del borde del muro norte de la sala de espera. La conexión eléctrica se realizó mediante un disyuntor independiente.

La velocidad del aire medida en distintos puntos de la sala de espera osciló entre 2 y  $3\text{ m s}^{-1}$ , dentro del rango recomendado ( $1,0\text{--}2,8\text{ m s}^{-1}$ ) para mejorar la disipación del calor (Herbut et al., 2018). Según Mondaca y Cook (2019), en días cálidos ( $T > 20^\circ\text{C}$ ), se recomienda proporcionar un mínimo de  $1\,699\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$  a  $2\,549\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$  por vaca para lograr entre 50 y 60 renovaciones de aire por hora, según el tamaño de las instalaciones. Por lo tanto, el caudal total fue considerado adecuado, especialmente considerando que el área evaluada contenía solo una parte del hato total de la EEAVM.

### Sistema de aspersión

Se instalaron cuatro aspersores marca Azud (boquilla gris) con un caudal individual de  $1,67\text{ L min}^{-1}$  y un radio de mojado de 3,75 m, conectados a una manguera de polietileno de 16 mm suspendida sobre la sala de espera. La fuente de agua provenía de un tanque de almacenamiento de agua potable previamente instalado.

El coeficiente de uniformidad del sistema fue del 61%, inferior al 70% recomendado por Zúñiga-Martínez (2004), pero considerado aceptable dadas las condiciones semi abiertas del espacio y la ocupación completa del área por los animales durante el ordeño, lo que minimiza zonas secas.

**Tabla 1.** Especificaciones técnicas del sistema de enfriamiento evaporativo (SEE) instalado en la sala de espera.

**Table 1.** Technical specifications of the evaporative cooling system (ECS) installed in the holding area.

|                                                        |                                    |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------|
| <b>Sistema de ventilación</b>                          |                                    |
| Modelo                                                 | 5131-5200-020                      |
| Tamaño (m)                                             | 132                                |
| Cantidad de aspas                                      | 3                                  |
| Caudal de aire (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )       | 26700                              |
| Motor                                                  | Motor eléctrico (1Ph) 1,5 HP       |
| Velocidad del viento a 6,6 m (m s <sup>-1</sup> )      | 5,2                                |
| <b>Sistema de aspersión</b>                            |                                    |
| Cantidad de aspersores                                 | 4                                  |
| Marca de aspersores                                    | Microaspersor Azud (boquilla gris) |
| Caudal de descarga por aspersor (L min <sup>-1</sup> ) | 1,67                               |
| Radio de mojado (m)                                    | 3,75                               |
| Diámetro de manguera de polietileno (mm)               | 16                                 |
| <b>Sala de espera</b>                                  |                                    |
| Tamaño (m <sup>2</sup> )                               | 103,9                              |
| Distancia entre ventiladores (m)                       | 4,9                                |
| Ángulo de inclinación de ventiladores                  | 30°                                |
| Altura libre de ventiladores sobre el suelo (m)        | 2                                  |
| Distancia entre aspersores (m)                         | 5                                  |

### Reducción del ITH mediante el sistema de enfriamiento evaporativo (SEE)

La eficiencia del SEE en la reducción del índice de temperatura y humedad (ITH) fue evaluada mediante el uso de dataloggers instalados en dos zonas diferenciadas: un área bajo influencia directa del SEE (sala de espera) y otra de referencia ambiental sin intervención del sistema. El ITH medio en el área tratada fue de 70,1, frente a 73,0 en el área de control.

A pesar de que esta disminución es estadísticamente significativa ( $p < 0,01$ ), los valores promedio observados se mantuvieron cercanos o por debajo de los umbrales críticos de estrés térmico reportados para vacas Holstein (ITH  $\approx 72$ ; Zimbelman et al., 2010). Es importante considerar que la raza Jersey (utilizada en este estudio) presenta mayor tolerancia al calor que la Holstein (Bohmanova et al., 2007; Igono et al., 1992; Ravagnolo & Misztal 2000, 2002). Por lo tanto, el grado de estrés calórico experimentado por las vacas durante el estudio fue mínimo, lo que sugiere que, si bien el SEE mejora las condiciones de confort térmico, las vacas no se encontraban bajo estrés térmico severo durante el periodo de evaluación.

### Influencia del SEE sobre la temperatura corporal del ganado

La evaluación del efecto del SEE sobre la temperatura corporal de las vacas se realizó mediante la medición de temperatura superficial antes y después del paso por la sala de espera, utilizando bloques experimentales homogéneos.

El Bloque A, expuesto al SEE, mostró una disminución significativa de su temperatura superficial, con un promedio de 3,97 °C respecto a su valor inicial ( $p < 0,001$ ). En contraste, el Bloque B, no expuesto al sistema, no presentó cambios significativos ( $p = 0,536$ ), lo que valida la influencia directa del sistema en la reducción térmica.

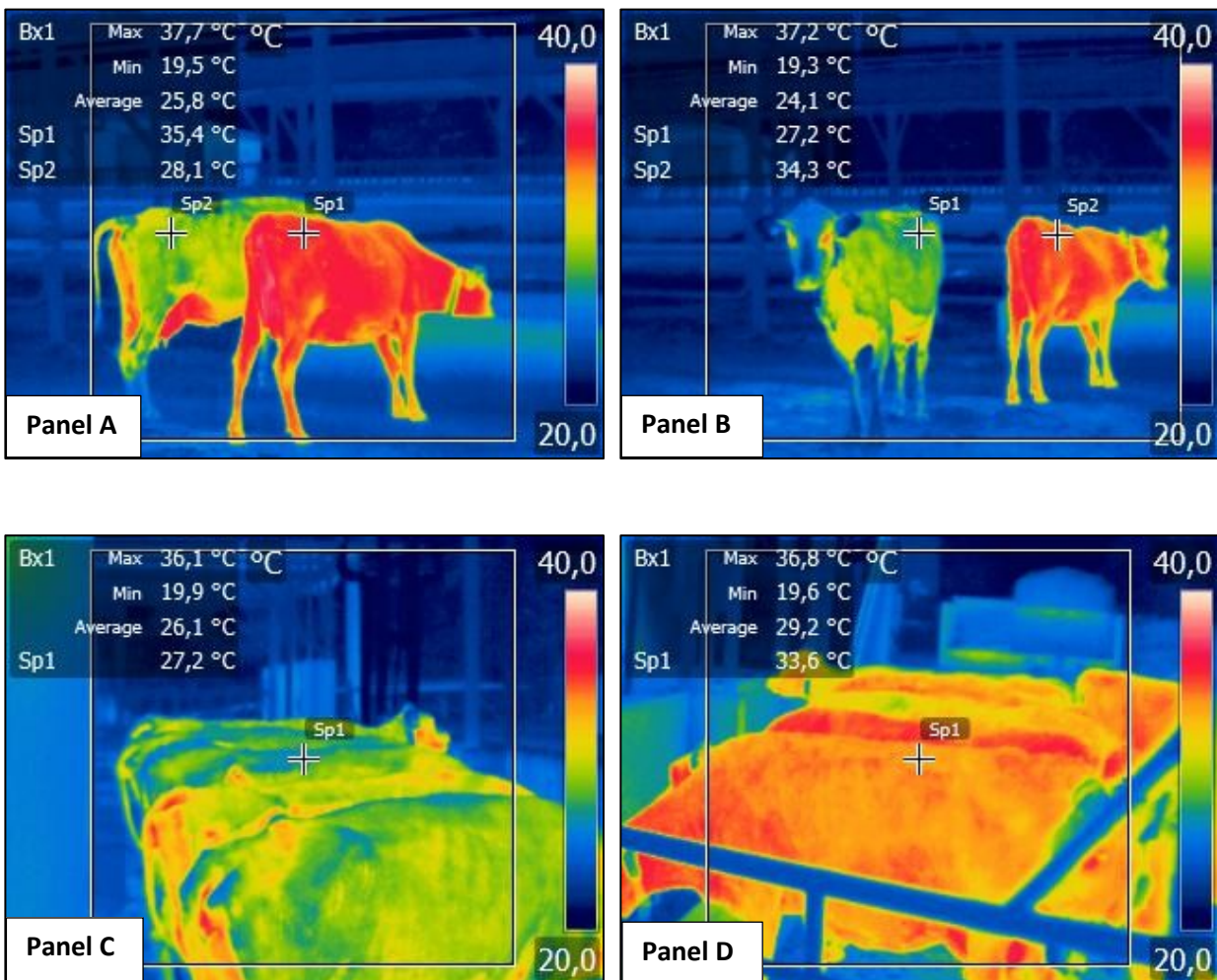
Esta reducción supera los valores reportados en estudios previos. Por ejemplo, Collier et al., (2006) encontraron disminuciones promedio de 1,95 °C con sistemas similares, mientras que Amamou et al., (2019) reportaron una reducción de 0,5 °C por cada punto de ITH disminuido. Según esta última relación, una reducción de 2,91 puntos en ITH observada en este estudio se traduciría en una disminución de aproximadamente 1,45 °C en temperatura corporal, menor a la registrada aquí. Factores como el alto caudal de ventilación, la estructura abierta del sistema y la baja densidad animal (0,15 animales m<sup>-2</sup>) probablemente facilitaron una mayor exposición efectiva al enfriamiento, explicando la diferencia.

Sin embargo, a pesar de esta disminución significativa de temperatura superficial, no se observaron cambios relevantes en los parámetros de producción de leche o rendimiento reproductivo. Esto coincide con el hecho de que, en animales bien manejados y en condiciones de estrés térmico moderado, reducciones en temperatura superficial no siempre se traducen en mejoras inmediatas de rendimiento productivo (Collier et al., 2006; West, 2010).

Es importante señalar una limitación de la medición mediante termografía infrarroja: la presencia de humedad o suciedad en la piel puede sesgar los valores registrados. En este estudio, las vacas se secaron de forma natural antes de la toma de datos, minimizando este sesgo. Sin embargo, la comparación con mediciones de temperatura rectal, consideradas más precisas para evaluar la temperatura corporal central, podría proporcionar información complementaria y robustecer la interpretación (Polikainen et al., 2012; Renaudeau et al., 2012).

Para ilustrar visualmente el efecto del SEE, la **Figura 1** muestra imágenes térmicas de vacas de ambos bloques experimentales, lo que evidenció diferencias de temperatura superficial aún una hora después de la exposición al sistema. En la parte superior, la imagen del Panel A presenta a Sp2, una vaca del bloque expuesto al SEE, y a Sp1, una vaca del bloque control. La imagen del Panel B, muestra la misma disposición invertida, con Sp1 del bloque expuesto al SEE y Sp2 del bloque control. En la parte inferior, en el Panel C se muestra una vista del grupo expuesto al SEE, mientras que en el Panel D se muestra una vista del grupo control.

Los colores reflejan diferencias de temperatura superficial y confirman que las vacas expuestas al SEE presentan zonas corporales más frías. Esto sugiere que el efecto del SEE persiste de forma temporal después de que las vacas abandonan la zona tratada y respalda los datos cuantitativos reportados sobre la reducción de la temperatura corporal.



**Figura 1.** Comparación de temperatura superficial mediante termografía infrarroja entre vacas expuestas y no expuestas al sistema de enfriamiento evaporativo (SEE).

**Figure 1.** Infrared thermographic comparison of surface temperature between dairy cows exposed and unexposed to the evaporative cooling system (ECS).

## Evaluación del SEE sobre la producción de leche y el rendimiento reproductivo del hato

### Efecto del SEE sobre la producción de leche

Durante un periodo de tres meses, se registró la producción de leche de dos bloques experimentales, uno expuesto al SEE y otro no expuesto (control) (**Tabla 2**).

El análisis de los resultados no mostró diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre los bloques en cuanto a la producción total de leche, independientemente del tratamiento aplicado. Por tanto, bajo las condiciones evaluadas, la exposición al SEE no tuvo un efecto directo sobre el volumen de leche producido.

**Tabla 2.** Producción total de leche (kg) por etapa experimental y bloque de tratamiento.

**Table 2.** Total milk production (kg) by experimental stage and treatment block.

| <b>Etapa</b> | <b>Bloque</b> | <b>Tratamiento</b> | <b>Leche total (kg)</b> | <b><i>p</i>-valor</b> |
|--------------|---------------|--------------------|-------------------------|-----------------------|
| 1            | A             | SEE                | 15,66                   | 0,77                  |
| 1            | B             | Control            | 16,61                   |                       |
| 2            | A             | SEE                | 14,76                   | 0,84                  |
| 2            | B             | SEE                | 15,03                   |                       |
| 3            | A             | Control            | 17,36                   | 0,87                  |
| 3            | B             | SEE                | 17,47                   |                       |

La ausencia de un efecto productivo significativo puede explicarse, en primer lugar, por las condiciones ambientales relativamente moderadas durante el periodo experimental. El ITH promedio fue de 73, apenas un punto por encima del umbral crítico comúnmente aceptado para vacas lecheras de producción media (ITH = 72; Broucek et al., 2007; Collier et al., 2006; Zimbelman et al., 2009). Esto sugiere que el grado de estrés calórico presente en la EEAVM fue leve y posiblemente insuficiente para generar pérdidas productivas detectables o para permitir una respuesta clara a la implementación del SEE.

Adicionalmente, las vacas utilizadas pertenecían a la raza Jersey, reconocida por su mayor tolerancia al estrés térmico en comparación con razas más sensibles como la Holstein (Kadzere et al., 2002; West 2010). En este contexto, es probable que el umbral de ITH a partir del cual se afecta la producción de leche en vacas Jersey sea superior al valor de 72.

Además, estudios en condiciones tropicales muestran que la relación entre ITH y reducción de producción lechera es más marcada en genotipos menos tolerantes, como la Holstein, y menor en razas adaptadas al trópico, como Jersey. Por ejemplo, para valores de ITH entre 72 y 88, las pérdidas de leche pueden variar según el genotipo, con tendencia menor en Jersey que en Holstein, con reducción de 0,29 vs. 0,41 kg·día<sup>-1</sup>, respectivamente (Ruiz-Jaramillo et al., 2019). Esto respalda la interpretación de que la falta de efecto productivo significativo observada puede estar asociada tanto a la tolerancia al calor de las Jerseys empleadas como a las condiciones ambientales moderadas del estudio.

Desde una perspectiva climática, debe considerarse que, en ambientes tropicales húmedos (como el del presente estudio) la elevada humedad relativa puede limitar la eficiencia de los sistemas de enfriamiento evaporativo basados en ventilación y aspersión de agua. En estas condiciones, la evaporación del agua desde la superficie corporal se ve restringida, reduciendo el potencial de disipación de calor, a diferencia de lo que ocurre en climas cálidos y secos, donde estos sistemas suelen mostrar mayores beneficios productivos (Broucek et al., 2007; Her et al., 1988).

Asimismo, el diseño temporal del experimento pudo influir en la respuesta productiva. La alternancia mensual de tratamientos, si bien permitió comparar condiciones con y sin SEE, pudo haber limitado la adaptación completa de las vacas al sistema. En general, los sistemas de enfriamiento se evalúan durante la totalidad del periodo estival, que puede extenderse entre dos y cuatro meses dependiendo de la severidad del estrés calórico, lo que permitió que los animales se acostumbren al estímulo y expresen respuestas productivas sostenidas. Estudios previos han señalado que la exposición intermitente o de corta duración a sistemas de enfriamiento puede generar respuestas variables, influenciadas por el comportamiento individual y la novedad del estímulo (Hedlund & Løvlie 2015; Mackay et al., 2014).

En contraste con el presente estudio, Her et al., (1988) reportaron incrementos de hasta 2,6 kg vaca<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> (+8%) bajo temperaturas ambientales cercanas a 32 °C y con protocolos de enfriamiento más intensivos y prolongados. De manera similar, Broucek et al., (2007) y Smith et al., (2012) observaron mejoras productivas significativas cuando los sistemas de enfriamiento fueron aplicados bajo condiciones de alto ITH y estrés térmico sostenido. Por el contrario, Martínez et al., (2021) no encontraron diferencias en producción de leche bajo condiciones ambientales similares a las del presente estudio, atribuyendo esta falta de respuesta a la variabilidad del ITH y a la ausencia de cambios en el consumo de materia seca, un factor clave en la determinación del rendimiento productivo.

En conjunto, estos resultados sugieren que el SEE evaluado mejora el confort térmico inmediato de las vacas, pero no necesariamente se traduce en incrementos productivos cuando el estrés calórico es leve, la raza es tolerante al calor y la exposición al sistema es limitada en el tiempo.

### Composición de la leche

Se observaron diferencias significativas ( $p < 0,02$ ) en el porcentaje de grasa (%) entre los bloques en todas las fases del experimento (**Tabla 3**). Sin embargo, estas diferencias no se relacionaron con el tratamiento, ya que se mantuvieron constantes independientemente de si las vacas fueron o no expuestas al SEE.

Al evaluar la cantidad de grasa producida en kilogramos, sí se observaron diferencias significativas en la tercera fase, lo cual podría sugerir un efecto tardío del SEE, posiblemente relacionado con el tiempo de adaptación al sistema. No obstante, no se cuenta con datos suficientes para confirmar esta hipótesis.

La leche corregida por grasa (LCG) no presentó diferencias significativas en ningún momento del estudio. Para el contenido de proteína cruda (PC) en la leche, se observaron diferencias significativas en el porcentaje (%) únicamente durante la tercera fase (**Tabla 4**), pero al evaluar la proteína en kilogramos, no se encontraron diferencias significativas, lo que sugiere que el SEE no tuvo un impacto claro sobre esta variable.

Diversos estudios han evidenciado efectos positivos del enfriamiento sobre los sólidos de la leche. Kaufman et al., (2020) reportaron incrementos de hasta un 23 % en el contenido de grasa en leche de vacas sometidas a condiciones de enfriamiento, especialmente cuando se les suministraron dietas con un contenido moderado de proteína cruda.

Por su parte, Ouellet et al., (2019), en un análisis de seis años de datos provenientes de Canadá, identificaron una disminución del 6 % tanto en grasa como en proteína en la leche de vacas expuestas a condiciones de calor, lo que refuerza la idea de que el estrés térmico afecta negativamente la calidad composicional de la leche. Sin embargo, en concordancia con los resultados obtenidos en el presente estudio, Martínez et al., (2021) no observaron mejoras significativas en la producción ni en los sólidos de la leche como resultado del enfriamiento. Esta ausencia de efecto fue atribuida a condiciones climáticas similares a las del presente trabajo y a la falta de diferencias en el consumo de materia seca entre los grupos evaluados, una variable clave para la producción lechera.

**Tabla 3.** Efecto del sistema de enfriamiento evaporativo (SEE) sobre el contenido y la producción de grasa láctea y la leche corregida por grasa.

**Table 3.** Effect of the evaporative cooling system (SEE) on milk fat content, fat yield, and fat-corrected milk.

| <b>Etapa</b> | <b>Bloque</b> | <b>Tratamiento</b> | <b>Grasa (%)</b> | <b><i>p</i>-valor</b> | <b>Grasa (kg)</b> | <b><i>p</i>-valor</b> | <b>LCG (kg)</b> | <b><i>p</i>-valor</b> |
|--------------|---------------|--------------------|------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|
| 1            | A             | SEE                | 3,77 b           | 0,01                  | 0,59              | 0,7                   | 15,11           | 0,75                  |
| 1            | B             | Control            | 3,93 a           |                       | 0,65              |                       | 16,41           |                       |
| 2            | A             | SEE                | 3,57 b           | 0,02                  | 0,53              | 0,63                  | 13,83           | 0,8                   |
| 2            | B             | SEE                | 3,82 a           |                       | 0,57              |                       | 14,63           |                       |
| 3            | A             | Control            | 3,49 b           | 0,02                  | 0,61 b            | 0,03                  | 16,04           | 0,83                  |
| 3            | B             | SEE                | 3,92 a           |                       | 0,68 a            |                       | 17,26           |                       |

LCG: Leche corregida por grasa al 4%.

**Tabla 4.** Efecto del sistema de enfriamiento evaporativo (SEE) sobre el contenido y la producción de proteína láctea.

**Table 4.** Effect of the evaporative cooling system (ECS) on milk protein content and protein yield.

| <b>Etapas</b> | <b>Bloque</b> | <b>Tratamiento</b> | <b>PC (%)</b> | <b><i>p</i>-valor</b> | <b>PC (kg)</b> | <b><i>p</i>-valor</b> |
|---------------|---------------|--------------------|---------------|-----------------------|----------------|-----------------------|
| 1             | A             | SEE                | 3,35          | 0,45                  | 0,52           | 0,35                  |
| 1             | B             | Control            | 3,35          |                       | 0,56           |                       |
| 2             | A             | SEE                | 3,31          | 0,25                  | 0,49           | 0,54                  |
| 2             | B             | SEE                | 3,31          |                       | 0,5            |                       |
| 3             | A             | Control            | 3,16 b        | 0,001                 | 0,55           | 0,23                  |
| 3             | B             | SEE                | 3,30 a        |                       | 0,58           |                       |

PC: Proteína cruda

### **Efecto del SEE sobre el conteo de células somáticas (CCS)**

En cuanto al conteo de células somáticas (CCS), los resultados indicaron que no hubo diferencias significativas ( $p = 0,122$ ) entre los grupos evaluados. El grupo control presentó un promedio de CCS de  $5,13 \pm 0,16 \log_{10}$ , mientras que el grupo expuesto al SEE mostró un valor promedio de  $5,50 \pm 0,16 \log_{10}$ . Este hallazgo sugiere que el SEE no tuvo un efecto negativo sobre la salud de la glándula mamaria, ya que no se observó un incremento del CCS en el grupo tratado, indicador comúnmente asociado con la presencia de mastitis u otras afecciones mamarias (Bobbo et al., 2021).

Un factor que podría haber influido en este resultado es el diseño del sistema de aspersión, que utilizó gotas de agua de tamaño relativamente grande. Este diseño permitía que el agua penetrara el pelaje de los animales y alcanzara la piel, pero cayera posteriormente al suelo por efecto de la gravedad sin mojar excesivamente las ubres, reduciendo así el riesgo de humedad persistente en esta área crítica.

Además, el área de instalación del SEE fue diseñada con un sistema de drenaje eficiente, que permitía evacuar rápidamente el exceso de agua. Esto disminuye la probabilidad de acumulación de humedad y, por consiguiente, de proliferación de patógenos perjudiciales para la salud del hato (Dahl 2018).

### **Efecto del SEE sobre el rendimiento reproductivo**

Se evaluaron dos indicadores de rendimiento reproductivo: días abiertos y número de servicios por concepción. En ambos casos, no se observaron diferencias significativas antes y después de la implementación del SEE en ninguno de los grupos evaluados.

Con respecto a los días abiertos, las vacas expuestas al SEE presentaron un promedio de  $101 \pm 2,28$  días abiertos tras dos meses de exposición al sistema, comparado con  $100 \pm 2,55$  días al inicio del periodo experimental ( $p = 0,932$ ). En el grupo control, el promedio fue de  $101 \pm 2,61$  días al inicio y  $99 \pm 1,73$  días al finalizar, sin diferencias significativas. En cuanto al número de servicios por concepción, el grupo tratado pasó de  $2,07 \pm 0,20$  a  $2,14 \pm 0,18$  servicios al final del experimento ( $p = 0,83$ ), mientras que el grupo control pasó de  $2,15 \pm 0,25$  a  $2,00 \pm 0,25$  ( $p = 0,71$ ).

Estos resultados indican que, bajo las condiciones del experimento, el SEE no generó mejoras evidentes en los parámetros reproductivos del hato. Una posible explicación es que el periodo de exposición al SEE no fue suficientemente prolongado. Her et al., (1988) destacan que para observar efectos reproductivos tangibles es necesario un periodo de enfriamiento significativamente mayor a 10 días, especialmente bajo condiciones de estrés por calor moderado. Además, como se mencionó previamente, el nivel de estrés térmico ambiental en la EEAVM fue relativamente bajo (ITH promedio cercano a 73), lo que también pudo contribuir a la ausencia de efectos observables en el desempeño reproductivo.

Jordan (2003) señala que, para evaluar adecuadamente el impacto del estrés calórico en parámetros reproductivos, se requiere de un seguimiento prolongado con datos mensuales, lo cual permite observar tendencias reales en contextos comerciales. También, resalta la importancia de considerar la duración e intensidad del estrés térmico, factores críticos para entender su efecto sobre la fertilidad del ganado lechero.

### **Análisis de costos de la implementación del SEE**

La implementación del SEE en la sala de espera de la EEAVM implicó una inversión inicial de ₡1 693 639 (US\$2 904,22). Los gastos operativos anuales se estimaron en ₡261 368 (\$448,19), mientras que el mantenimiento anual representó un costo adicional de ₡100 959 (US\$173,12), que contempla tareas como la revisión de aspersores, limpieza de filtros, mantenimiento de ventiladores y ajustes en la red de tuberías.

La operación del SEE fue proyectada para 4 meses al año, correspondientes a la estación seca en Costa Rica, cuando es más probable la presencia de condiciones de estrés térmico en las regiones de mayor producción lechera del país: la Región Central y la Zona Norte (Barrientos & Villegas 2010; IMN, 2008).

Estos valores permiten establecer una estimación clara de los recursos económicos requeridos para implementar y sostener el funcionamiento del sistema en condiciones comerciales.

### **Implicaciones del estudio, fortalezas, limitaciones y oportunidades**

Es importante considerar que la implementación de un sistema de enfriamiento evaporativo debe evaluarse según el grado de estrés térmico del ganado, ya que representa una inversión que se recupera a mediano plazo. En condiciones normales, los valores de ITH en la región suelen ser más elevados, lo que genera estrés calórico. Sin embargo, durante el presente estudio, el ITH promedio fue de 73, apenas un punto por encima del umbral crítico para vacas de producción media, lo que indica que el estrés térmico fue leve. Esto explica la ausencia de efectos significativos sobre la producción de leche y los parámetros reproductivos, y resalta la importancia de contextualizar la aplicación de estrategias de enfriamiento según la severidad ambiental.

Aun así, el SEE mejoró el microclima en la sala de espera y redujo la temperatura superficial de las vacas, aunque estas mejoras en el confort térmico no se tradujeron en incrementos productivos ni en cambios consistentes en la composición láctea. La respuesta productiva al enfriamiento depende estrechamente de la severidad del estrés térmico, del tipo racial y del contexto climático. La utilización de vacas Jersey, más tolerantes al calor, y las condiciones de ITH moderado probablemente limitaron la magnitud de la respuesta productiva. En ambientes tropicales húmedos, la elevada humedad relativa también puede reducir la eficiencia de los sistemas basados en ventilación y aspersión, al restringir la evaporación del agua desde la superficie corporal. En estos casos, estrategias más simples, como la ventilación mecánica, podrían ser suficientes.

Desde el punto de vista metodológico, una fortaleza del estudio fue la evaluación del SEE en condiciones reales de finca, integrando mediciones ambientales (ITH) y fisiológicas (temperatura superficial) complementadas con termografía infrarroja, lo que permitió caracterizar de manera integral la respuesta inmediata del ganado. Sin embargo, la alternancia mensual de tratamientos pudo haber limitado la adaptación completa de las vacas, ya que en la práctica los sistemas de enfriamiento se mantienen de forma continua durante toda la estación cálida para maximizar su efecto.

Estos resultados subrayan la necesidad de evaluar el impacto del SEE durante periodos más prolongados y bajo estrés térmico más severo. Asimismo, sería relevante comparar la respuesta entre razas con distinta susceptibilidad al calor, como Holstein, cruces Jersey-Holstein, entre otras, e incluir indicadores fisiológicos adicionales (temperatura rectal, frecuencia respiratoria, consumo de materia seca) y análisis económicos detallados, para comprender de manera integral el papel de los sistemas de enfriamiento en sistemas lecheros tropicales.

### **Conclusiones**

Los resultados del presente estudio indican que la implementación del SEE en la EEAVM no generó mejoras significativas en la producción de leche ni en los indicadores reproductivos del hato evaluado. Esta ausencia de respuesta productiva se asocia, principalmente, con las condiciones ambientales moderadas durante el periodo experimental, en el cual el ITH se mantuvo cercano al umbral de estrés térmico comúnmente aceptado.

El uso del SEE no tuvo efectos adversos sobre la salud de la ubre, ya que el conteo de células somáticas no presentó variaciones significativas, lo que sugiere que el diseño y la operación del sistema fueron adecuados para evitar condiciones predisponentes a enfermedades como la mastitis. Desde una perspectiva económica, el sistema no resultó rentable bajo las condiciones actuales de la EEAVM, dado que no generaron incrementos productivos capaces de compensar la inversión inicial y los costos operativos. No obstante, el SEE demostró ser efectivo en la mejora del microclima y del confort térmico inmediato del ganado, lo que representa un beneficio relevante desde el punto de vista de bienestar animal. En este contexto, el valor del SEE trasciende los efectos productivos de corto plazo, posicionándose como una herramienta de adaptación ante el cambio climático, particularmente, frente a la creciente frecuencia e intensidad de eventos de calor extremo en regiones lecheras. Su implementación futura debería considerar el tipo racial, las condiciones climáticas locales y un análisis costo-beneficio ajustado a escenarios ambientales más exigentes.

## Literatura citada

- Amamou, H., Beckers, Y., Mahouachi, M., & Hammami, H. (2019). Thermotolerance indicators related to production and physiological responses to heat stress of Holstein cows. *Journal of Thermal Biology*, 82, 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.03.016>
- Barrientos, O., & Villegas, L. (2010). *Cadena productiva de leche: Políticas y acciones*. San José, Costa Rica.
- Bernard, V., Staffa, E., Mornstein, V., & Bourek, A. (2013). Infrared camera assessment of skin surface temperature-effect of emissivity. *Physica Medica*, 29(6), 583-591. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2012.09.003>
- Bobbo, T., Biffani, S., Taccioli, C., Penasa, M., & Cassandro, M. (2021). Comparison of machine learning methods to predict udder health status based on somatic cell counts in dairy cows. *Scientific Reports*, 1(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93056-4>
- Bohmanova, J., Misztal, I., & Cole, J. B. (2007). Temperature-humidity indices as indicators of milk production losses due to heat stress. *Journal of Dairy Science*, 90(4), 1947-1956. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-513>
- Brouček, J., Ryba, S., Mihina, S., Uhrincat, M., & Kisac, P. (2007). Impact of thermal-humidity index on milk yield under conditions of different dairy management. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 16(3), 329-344. <https://doi.org/10.22358/jafs/66755/2007>
- Collier, R., Dahl, G. E., & VanBaale, M. J. (2006). Major advances associated with environmental effects on dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 89(4), 1244-1253. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72193-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72193-2)
- Dahl, G. E. (2018). Impact and mitigation of heat stress for mastitis control. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 34(3), 473-478. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2018.07.002>
- DeShazer, J. A., Hahn, G.L., & Xin, H. (2013). Chapter 1: Basic principles of the thermal environment and livestock energetics. En *Livestock Energetics and Thermal Environment Management*.

- Echeverri-Echeverri, D. M., Galeano-Vasco, L. F., Ramírez Arias, J. P., Cerón-Muñoz, M. F., & Márquez Girón, S.M. (2018). Efecto de la temperatura ambiente en la temperatura superficial de zonas negras y blancas del pelaje de un hato de vacas Holstein en el departamento de Antioquia, Colombia. *Revista de Medicina Veterinaria*, 36, 97-107.
- Elizondo-Salazar, J. A. (2015). Calidad nutricional y consumo de forraje de maíz (*Zea mays*) y forraje de Estrella Africana (*Cynodon nlemfuensis*) con o sin alimento balanceado en cabras. *Nutrición Animal Tropical*, 9(2), 11-26. <https://doi.org/10.15517/nat.v9i2.20991>
- Felis, A., Pica-Ciamarra, U., & Reyes, E. (2025). Dairy's development and socio-economic transformation: A cross-country analysis. *World*, 6(3), 105. <https://doi.org/10.3390/world6030105>
- Ferrufino-Suárez, A. J., Mora-Valverde, D., & Villalobos-Villalobos, L. A. (2022). Biomass and bromatology of African Stargrass (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst) with five regrowth stages. *Agronomía Mesoamericana*, 33(2). <https://doi.org/10.15517/am.v33i2.47746>
- Gil, F., Taf, R., Mikula, K., Skrzypczak, D., Izydorczyk, G., Moustakas, K., & Chojnacka, K. (2024). Advancing sustainable agriculture: Converting dairy wastes into amino acid fertilizers. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 42, 101782. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101782>
- Hedlund, L., & Løvlie, H. (2015). Personality and production: Nervous cows produce less milk. *Journal of Dairy Science*, 98(9), 5819-5828. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8667>
- Her, E., Wolfenson, D., Flamenbaum, I., Folman, Y., Kaim, M., & Berman, A. (1988). Thermal, productive, and reproductive responses of high yielding cows exposed to short-term cooling in summer. *Journal of Dairy Science*, 71(4), 1085-1092. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(88\)79656-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(88)79656-3)
- Herbut, P., Angrecka, S., & Walczak, J. (2018). Environmental parameters to assessing of heat stress in dairy cattle - a review. *International Journal of Biometeorology*, 62(12), 2089-2097. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1629-9>
- Igono, M. O., Bjotvedt, G., & Sanford-Crane, H. T. (1992). Environmental profile and critical temperature effects on milk production of Holstein cows in desert climate. *International Journal of Biometeorology*, 36(2), 77-87. <https://doi.org/10.1007/BF01208917>

- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (2008). *Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica*.
- Instituto Nacional de Censos, Costa Rica (INEC). (2015). *VI Censo Nacional Agropecuario: Características de las Fincas y de las personas productoras. Resultados generales*. 178 p.
- Jordan, E. R. (2003). Effects of heat stress on reproduction. *Journal of Dairy Science*, 86(Suppl. 1), E104-E114.
- Kadzere, C. T., Murphy, M. R; Silanikove, N., & Maltz, E. (2002). Heat stress in lactating dairy cows: A review. *Livestock Production Science*, 77(1), 59-91. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(01\)00330-X](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(01)00330-X)
- Kaufman, J. D., Bailey, H. R., Kennedy, A. M., Löffler, F.E., & Rius, A. G. (2020). Cooling and dietary crude protein affected milk production on heat-stressed dairy cows. *Livestock Science*, 240, 104111. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104111>
- MacKay, J. R. D., Haskell, M. J., Deag, J. M., & van Reenen, K. (2014). Fear responses to novelty in testing environments are related to day-to-day activity in the home environment in dairy cattle. *Applied Animal Behaviour Science*, 152, 7-16. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2013.12.008>
- Martínez, R. S., Palladino, R. A., Banchero, G. F., Martín, R., Nanni, M. S., Juliano, N., Iorio, J. D., & La Manna, A. (2021). Providing heat-stress abatement to late-lactation Holstein cows affects hormones, metabolite blood profiles, and hepatic gene expression but not productive responses. *Applied Animal Science*, 37(4), 490-503. <https://doi.org/10.15232/aas.2020-02109>
- Mondaca, M. R., & Cook, N. B. (2019). Modeled construction and operating costs of different ventilation systems for lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 102(1), 896-908. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14697>
- National Research Council (NRC). (1971). *A guide to environmental research on animals*. National Academy of Sciences.
- Oliveira, C. P., Sousa, F. C., Silva, A. L. D., Schultz, É. B., Valderrama Londoño, R. I., & Souza, P. A. R. (2025). Heat stress in dairy cows: Impacts, identification, and mitigation strategies - A review. *Animals*, 15(2), 249. <https://doi.org/10.3390/ani15020249>

- Orbach, N. (2019). Influence of a feed additive containing vitamin B12 and yeast extract on milk production and body temperature of grazing dairy cows under high temperature-humidity index environment. *Livestock Science*, 221, 28-32. <https://doi.org/10.1016/J.LIVSCI.2019.01.012>
- Ouellet, V., Cabrera, V. E., Fadul-Pacheco, L., & Charbonneau, E. (2019). The relationship between the number of consecutive days with heat stress and milk production of Holstein dairy cows raised in a humid continental climate. *Journal of Dairy Science*, 102(9), 8537-8545. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-16060>
- Poikalainen, V., Praks, J., Veermäe, I., & Kokin, E. (2012). Infrared temperature patterns of cow's body as an indicator for health control at precision cattle farming. *Agronomy Research*, 10(Spec. Iss. 1), 187-194.
- Ravagnolo, O., & Misztal, I. (2000). Genetic component of heat stress in dairy cattle, parameter estimation. *Journal of Dairy Science*, 83(9), 2126-2130. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75095-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75095-8)
- Ravagnolo, O., & Misztal, I. (2002). Studies on genetics of heat tolerance in dairy cattle with reduced weather information via cluster analysis. *Journal of Dairy Science*, 85(6), 1586-1589. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74228-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74228-8)
- Renaudeau, D., Collin, A., Yahav, S., de Basilio, V., Gourdine, J. L., & Collier, R. J. (2012). Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. *Animal*, 6(5), 707-728. <https://doi.org/10.1017/S1751731111002448>
- Ruiz-Jaramillo, J. I., Vargas-Leitón, B., Abarca-Monge, S., & Hidalgo-León, H. G. (2019). Efecto del estrés calórico sobre la producción del ganado lechero en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 30(3), 733-750. <https://doi.org/10.15517/am.v30i3.35984>
- SAS Institute Inc. (2018). SAS/STAT 15.1 User's guide. (Version 9.4) SAS Institute Inc.
- Smith, J. F., Collier, R. J., Harner, J. P., & Bradford, B. J. (2012). Strategies to reduce heat stress in dairy cattle. En R. J. Collier & J. L. Collier (Eds.) *Environmental Physiology of Livestock* (pp. 65-84). John Wiley & Sons, Inc.
- van Zanten, H. H. E., Meerburg, B. G., Bikker, P., Herrero, M., & de Boer, I. J. M. (2016). The role of livestock in a sustainable diet: a land-use perspective. *Animal*, 10(4), 547-549. <https://doi.org/10.1017/S1751731115002694>

- West, J. W. (2010). Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 86(6), 2131-2144. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73803-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X)
- Zimbelman, R. B., Baumgard, L. H., & Collier, R. J. (2010). Effects of encapsulated niacin on evaporative heat loss and body temperature in moderately heat-stressed lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 93(6), 2387-2394. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2557>
- Zimbelman, R. B., Rhoads, R., Rhoads, M. L., Duff, G. C., Baumgard, L.H., & Collier, R. J. (2009). *A re-evaluation of the impact of temperature humidity index (THI) and black globe temperature humidity index (BGHI) on milk production in high producing dairy cows*. The University of Arizona.
- Zúñiga-Martínez, É. (2004). *Diseño y evaluación del riego a presión*. (1ª ed.). Editorial de la Universidad de Costa Rica.

