



**UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO PARA GANADO LECHERO EN LA
ESTACIÓN EXPERIMENTAL ALFREDO VOLIO MATA**

Trabajo final de graduación sometido a la consideración de la

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Como parte de los requisitos para aspirar al título y grado de

LICENCIATURA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y DE BIOSISTEMAS

FRANCISCO BARADÍN SANDÍ

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica

2021

Trabajo Final de Graduación sometido a revisión por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.




ING. FRANCISCO BARADÍN SANDÍ, BACH.

Candidato



ING. GEOVANNI CARMONA VILLALOBOS, LIC.

Director, Comité Asesor



ING. JORGE ALBERTO ELIZONDO SALAZAR,

PHD.

Miembro, Comité Asesor



ING. JUAN ROBERTO MORA CHAVES,


MSc.

Miembro, Comité Asesor



ING. MARTA MONTERO CALDERÓN, PH.D

Presidente, Tribunal Examinador



ING. RONNY CHAVES MATA

Lector, Tribunal Examinador

Dedicatoria

A mi familia, quienes son lo más importante para mí en esta vida.

Agradecimientos

Al director de Comité Asesor, Ing. Geovanni Carmona Villalobos, por actuar como un guía en el tema de investigación, incluso mucho antes de su comienzo formal.

Al miembro del Comité Asesor, Ing. Jorge Alberto Elizondo Salazar, por hacer posible este trabajo y por confiar en mí para llevarlo a cabo.

Al miembro del Comité Asesor, Ing. Juan Roberto Mora Chaves, por sus valiosos consejos a lo largo de toda esta investigación.

Al profesor Ricardo Radulovich Ramírez, que en paz descansa, por su esencial colaboración en aquel momento.

A todo el personal de la Estación Experimental Alfredo Volio Mata, quienes siempre se mostraron dispuestos a colaborar en la consecución de este trabajo.

A todo el personal docente y administrativo de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas.

A Fanny, Lucha, Janet, Olga, Karol, Vita, Celia, Rosa, Sol, Mirta, Viria y demás amigas; quienes fueron las verdaderas protagonistas de este trabajo.

Resumen

El estrés por calor en las vacas lecheras se genera cuando las condiciones ambientales y fisiológicas de los animales provocan que estas produzcan más calor del que son capaces de disipar mediante la respiración o la evaporación. Este tipo de estrés puede tener efectos adversos sobre la salud de los animales, afectando consecuentemente variables como su producción de leche o rendimiento reproductivo. El trabajo desarrollado en la Estación Experimental Alfredo Volio Mata (EEAVM) incluyó la instalación de un sistema de enfriamiento evaporativo (SEE) para ganado lechero, que disminuyera el efecto del estrés por calor que las condiciones climáticas del lugar pudiesen estar teniendo sobre ellas. El SEE instalado se ubica en la sala de espera previo a la sala de ordeño, donde el hato de vacas se reúne en un espacio semicerrado mientras esperan su momento para ser ordeñadas. Este sistema consta de un sistema aéreo de aspersion de agua y un sistema de ventilación compuesto por dos ventiladores instalados para dicho fin. Con el objetivo de validar el funcionamiento del SEE se midió el efecto de este sobre el Índice de Temperatura-Humedad (ITH) en la sala de espera y también la temperatura corporal de las vacas; así como variables fisiológicas en los animales, específicamente la producción y calidad de la leche y el rendimiento reproductivo. En general, el SEE logró una disminución promedio de 2,91 puntos del ITH en la sala de espera cuando estuvo en funcionamiento. En cuanto a la temperatura corporal, se logró observar que el grupo de vacas expuestas al SEE presentaba temperaturas corporales de 3,97 °C menores a aquellas que no fueron expuestas al SEE. Sin embargo, este efecto no se vio reflejado sobre la cantidad de leche producida por

dichas vacas, ni tampoco sobre parámetros de calidad como la cantidad de grasa o proteína en la leche, o el conteo de células somáticas (CCS); ya que ambos bloques experimentales no presentaron diferencias en este ámbito. El costo total de inversión del proyecto fue de ₡ 1.693.639 y los costos anuales calculados de operación y mantenimiento fueron de ₡ 261.368 y ₡ 100.959; respectivamente. Bajo este escenario de costos y proyección de ingresos con los resultados obtenidos en el experimento, el proyecto no es rentable ya que no se genera el flujo positivo de efectivo suficiente que justifique la inversión. No obstante, se presentan algunos escenarios teóricos en que, bajo condiciones climáticas más severas, los indicadores utilizados arrojan números positivos que podrían justificar financieramente la inversión de este tipo de sistemas en algunas fincas lecheras costarricenses.

Contenido

Resumen.....	v
Introducción.....	13
Objetivo general.....	14
Objetivos específicos	15
Marco teórico	16
1- Causas del estrés por calor.....	19
2- Señales de estrés por calor en ganado lechero	20
3- Índice de temperatura-humedad	22
3.1- Factores ambientales	22
3.2- Límite de ITH.....	24
4- Efectos del estrés por calor en vacas lecheras	27
5- Estrategias para reducción de estrés por calor	29
5.1- Ventajas y desventajas de las distintas estrategias de mitigación de calor	32
6- Evaluación del estrés por calor en vacas lecheras utilizando datos de temperatura	
35	
Metodología	36
1- Diseño del sistema de aspersión y ventilación en el espacio dedicado a enfriamiento evaporativo del ganado lechero:	39

2- Efecto del sistema de enfriamiento evaporativo sobre la producción de leche y rendimiento reproductivo	45
3- Análisis financiero de la implementación del sistema.....	47
Resultados y discusión.....	50
1- Diseño del sistema de enfriamiento evaporativo para ganado lechero	50
1.1- Instalación del sistema de enfriamiento evaporativo.....	50
1.2- Reducción del ITH a causa del SEE	57
1.3- Influencia del SEE sobre la temperatura corporal del ganado lechero	59
2- Evaluación del SEE sobre la producción de leche y el rendimiento reproductivo del hato.....	63
2.1- Efecto del SEE sobre la producción de leche.....	63
2.2- Efecto del SEE sobre el conteo de células somáticas.....	69
2.3- Efecto del SEE sobre el rendimiento reproductivo	70
3- Análisis financiero de la implementación del SEE en una finca lechera.....	71
3.1- Evaluación financiera basado en el caso práctico de la EEAVM.....	72
3.2- Evaluación financiera basada en un caso teórico.....	75
Conclusiones.....	78
Recomendaciones.....	81
Referencias bibliográficas	83

Anexo 1: Valores de ITH medidos en el área bajo la influencia del SEE y el área fuera de la influencia del SEE (ambiente)	94
Anexo 2: Principales costos para puesta en marcha del SEE.....	96
Inversión:	96
Operación:	96
Mantenimiento:	97
Anexo 3: Evaluaciones financieras para casos teóricos propuestos.....	98
Caso teórico basado en las observaciones hechas en la EEAVM:.....	98
Caso teórico basado en una diferencia entre ITH_{max} y ITH_{lim} de 2:.....	99
Caso teórico basado en una diferencia entre ITH_{max} y ITH_{lim} de 4:.....	100
Caso teórico basado en una diferencia entre ITH_{max} y ITH_{lim} de 6:.....	101

Índice de Figuras

Figura 1. Componentes físicos y mentales del enfoque de las cinco libertades [7]	17
Figura 2. Principales vías de pérdida de calor y estrategia utilizadas en las fincas lecheras	30
Figura 3. Ejes de trabajo del proyecto	37
Figura 4. Toma de datos experimentales	37
Figura 5. Sala de espera previo y posterior a la instalación del SEE	40
Figura 6. Medición de coeficiente de uniformidad del riego aplicado	41
Figura 7. Diseño experimental para medición de temperatura superficial	42
Figura 8. Diseño experimental para medición del ITH dentro de la sala de espera	43
Figura 9. Colocación de Data Loggers en la sala de espera	44
Figura 10. Diseño experimental para medición de la producción de leche y el rendimiento reproductivo	45
Figura 11. Separación de muestras para análisis de composición de leche	46
Figura 12. Ubicación de la sala de espera dentro del módulo de lechería	51
Figura 13. Detalle de la sala de espera donde fue ubicado el SEE	51
Figura 14. Ventilador instalado en la sala de espera de la EEAVM	52
Figura 15. Distancia recomendada entre ventiladores [70]	53
Figura 16. Detalle de la separación y altura de colocación de los ventiladores instalados	53

Figura 17. Disposición de los aspersores en la sala de espera	56
Figura 18. Área de influencia del SEE en la sala de espera	56
Figura 19. Reducción de ITH a causa del SEE.....	59
Figura 20. Efecto del SEE sobre la temperatura corporal del ganado lechero	60
Figura 21. Comparación mediante imágenes térmicas del ganado lechero evaluado	62
Figura 22. Combinaciones de T y HR para un ITH superior a 78	77

Índice de Cuadros

<i>Cuadro 1. Relación del ITH con la tasa de respiración y la temperatura rectal en ganado vacuno [23].</i>	21
<i>Cuadro 2. Modelos propuestos para el cálculo del ITH.</i>	23
<i>Cuadro 3. Límites de ITH determinados en distintos estudios. Tomado de [26]</i>	25
<i>Cuadro 4. Generalidades técnicas del SEE instalado en la sala de espera.</i>	55
<i>Cuadro 5. Valores de ITH medidos</i>	57
<i>Cuadro 6. Leche total producida por bloque experimental</i>	63
<i>Cuadro 7. Efecto del SEE sobre la grasa en la leche*</i>	67
<i>Cuadro 8. Efecto del SEE sobre la proteína de la leche</i>	68
<i>Cuadro 9. Efecto del SEE sobre el CCS</i>	69
<i>Cuadro 10. Resumen de costos asociados al SEE</i>	72
<i>Cuadro 11. Indicadores financieros caso práctico EEAVM</i>	73
<i>Cuadro 12. Indicadores financieros caso teórico EEAVM</i>	75
<i>Cuadro 13. Indicadores financieros casos teóricos propuestos</i>	76

Introducción

La industria lechera, así como los animales de producción que en ella participan, son de gran importancia en la sociedad ya que cumplen un rol importante en aspectos como la transformación de subproductos en proteína para consumo humano, uso de tierras marginales para producción, fertilidad de suelos e incluso como factor clave de estatus socioeconómico [1]. Para el año 2019, en Costa Rica, se estima que la producción total de leche era de 1154 millones de litros por año, con el consumo per cápita más alto de la región centroamericana [2]. Sin embargo, este alto consumo, conjugado con la actual situación económica mundial, ha obligado a la industria lechera a aumentar la producción al mismo tiempo que hace frente a una presión ambiental cada vez más severa ante escenarios de cambio climático. En este sentido, se ha buscado que las lecherías actuales hagan uso de distintas tecnologías que logren el aumento de producción que el mercado exige. Entre esas tecnologías se pueden citar las mejoras genéticas de los animales, la prevención de enfermedades, la optimización de la dieta animal y el uso de tecnologías para el incremento de la productividad [1].

Como consecuencia del escenario planteado, se prevé que el ganado lechero actual y futuro esté sometido a esquemas de producción más demandantes, en escenarios de cambio climático más severos. Esto sin duda coloca una gran presión sobre los animales, ya que producciones más altas y condiciones ambientales más rigurosas pueden provocar un aumento en las temperaturas corporales de los animales, conllevando a un deterioro de su bienestar y por ende un deterioro en aspectos como salud animal, producción de leche y reproductividad [3].

Para hacer frente a estos escenarios, se han planteado una serie de estrategias en las fincas lecheras que disminuyan el efecto de los climas calientes en los animales, los cuales se basan principalmente en la modificación del ambiente inmediato que los rodea. Dichas estrategias se pueden dividir en dos grupos principales: aquellas que buscan humedecer ya sea a las vacas o el aire que las rodea, o también aquellas estrategias que buscan incrementar la tasa de intercambio de calor convectivo mediante el incremento de la velocidad del aire alrededor de las vacas.

El estudio y la investigación de estas estrategias aplicadas en el ganado lechero, es un punto de partida importante en la lucha por la adaptabilidad al cambio climático y un paso hacia la búsqueda de prácticas de producción más eficientes que le generen mayor rentabilidad al sector. Así mismo, el uso de dichas estrategias que combaten el estrés por calor en los animales podría brindar nuevas oportunidades de producción en lugares que por sus condiciones climáticas no se consideraban en un principio como aptos para desarrollar la actividad lechera, abriendo nuevas posibilidades de desarrollo.

Objetivo general

Estudiar la efectividad de la implementación de un sistema de enfriamiento evaporativo en la reducción del estrés calórico del ganado lechero de la Estación Experimental Alfredo Volio Mata.

Objetivos específicos

- 1) Diseñar el sistema de aspersión y ventilación necesario para poner en operación un sistema de enfriamiento evaporativo para reducción de la temperatura del ganado lechero en la Estación Experimental Alfredo Volio Mata.
- 2) Evaluar el impacto del sistema de enfriamiento evaporativo sobre la producción de leche y el rendimiento reproductivo del ganado de leche de la Estación Experimental Alfredo Volio Mata.
- 3) Realizar el análisis financiero que determine la viabilidad de la implementación de un sistema de enfriamiento evaporativo en el contexto de una finca lechera típica.

Marco teórico

El bienestar de los animales es un tema cada vez más importante dentro de los esquemas productivos actuales. Este hecho ha ocasionado que en los últimos 15-20 años gran parte de la ciencia animal se haya enfocado en buscar formas de lograr altos niveles de productividad de la mano con el bienestar animal [4]. Uno de los enfoques más ampliamente conocidos en esta materia por la inclusividad de sus factores tiene que ver con las llamadas “Cinco Libertades” [5]. Dicho enfoque abarca tanto aspectos físicos como mentales del animal (ver Figura 1) y sugiere que los animales de granja deben estar libres de sed, hambre y desnutrición; libres de condiciones de incomodidad; de dolor, lesiones o enfermedades; libres para expresar su comportamiento natural y libres de miedo y angustia. Para evaluar esta condición, en las explotaciones han sido utilizados criterios que se enfocan en el ambiente del animal (instalaciones, espacios disponibles, tamaños del hato, uso de ataduras, etc.), así como criterios basados en el estado propio del animal (problemas de salud y niveles de producción) [6].



Figura 1. Componentes físicos y mentales del enfoque de las cinco libertades [7]

El estrés por calor es una condición que afecta al ganado lechero y surge cuando el animal gana más calor del que puede perder en el ambiente [8], ocasionando así un detrimento en su nivel de confort. El proveer un ambiente idóneo y confortable en el que pueda vivir el animal, así como proveerlo del espacio suficiente y las instalaciones adecuadas son medidas que buscan evitar la existencia de estrés por calor en los animales del hato [7]; incrementando el bienestar en las vacas y yendo acorde a la tendencia de buscar una mayor productividad en las fincas lecheras a la vez que se respetan los derechos animales.

El principal impacto que tiene el estrés por calor en las vacas lecheras se centra en la producción de leche; sin embargo, también las tasas de crecimiento y la fertilidad de los

animales se ven perjudicadas [9]. Una de las razones por las que se da esta reducción en las tasas reproductivas del ganado lechero tiene que ver con la tasa de supervivencia de los embriones, las cuales se ven comprometidas en condiciones de calor [10]; así como las concentraciones reducidas de estradiol sérico durante el ciclo estral de las vacas en las mismas condiciones, indicando un deficiente desarrollo sexual [11]. A nivel de fincas, este impacto se puede ver reflejado en importantes pérdidas económicas que le restan competitividad al sector lechero del país.

Para medir el nivel de calor que causa el estrés, se han creado distintos índices que toman en cuenta los componentes ambientales que lo producen. Estos índices consideran factores ambientales como la temperatura del aire, la humedad relativa, la radiación solar, el movimiento del aire y la precipitación. No obstante, debido a una limitada disponibilidad de datos fiables o una mayor dificultad para conseguirlos, la mayoría de los estudios suelen enfocarse en la temperatura y la humedad relativa como los factores ambientales principales [12]. El Índice de Temperatura-Humedad (ITH), creado por Thom [13] y adaptado por Berry *et al.* [14] para su uso en ganado, ha sido utilizado extensivamente por varios investigadores para estimar el grado de estrés por calor en ganado lechero y de carne [12], [15], [16]; considerando el rango entre 68 y 72 como el límite máximo en que deben de estar los animales para no sufrir las consecuencias del estrés por calor.

Sin embargo, antes de conocer más acerca del Índice de Temperatura-Humedad, es necesario conocer las causas del estrés por calor, así como las señales que indican que una vaca lechera puede estar sufriendo de esta condición.

1- Causas del estrés por calor

La principal razón por la que se suele observar un decaimiento en las tasas de producción de leche y problemas reproductivos en vacas lecheras bajo condiciones de estrés por calor es la reducción en su ingesta de alimentos [17]. Adicionalmente, como explica Collier *et al.* [18], es importante mencionar que un estado endocrino alterado, la reducción en la rumia y absorción de nutrientes, así como un incremento en los requerimientos de mantenimiento debido al estrés por calor, resultan en una reducción de nutrientes y por lo tanto menos energía disponible para la producción de leche. Además, en dicha condición de estrés se suele dar un incremento en el flujo sanguíneo hacia la piel con el fin de disipar el calor a través de la evaporación tanto desde la piel como del tracto respiratorio, reduciendo la sangre que es recibida en órganos internos como por ejemplo los del tracto digestivo, lo que conlleva a menor movimiento de agua y nutrientes y afectando directamente la producción de leche [19].

Similar a como ocurre con las vacas en lactancia temprana, las vacas que presentan estrés por calor no consumen la suficiente materia seca para poder sostener su producción de leche máxima [20]. Sin embargo, a diferencia de las vacas en lactancia temprana, las sometidas a estrés por calor no presentan una disminución en concentración de insulina en sangre, impidiendo que la grasa corporal se utilice para suplir los requerimientos energéticos y disminuyendo las concentraciones de ácidos grasos no esterificados (NEFAS, por sus siglas en inglés) en sangre [21]. Esta reacción genera que la glucosa en las vacas no sea utilizada para la producción de leche y en cambio se utilice para producción de energía, ya que la oxidación de la glucosa es más eficiente y por ende conlleva a una reducción en la producción de calor metabólico [22].

Varios estudios han sido conducidos en este sentido; en uno de ellos, realizado por Lamp *et al.* [22], dos grupos de vacas en lactancia temprana fueron alimentados equitativamente, sometiendo a uno de los grupos a condiciones de estrés por calor y al otro grupo a condiciones termoneutrales. En los resultados recopilados, se observaron diferencias las concentraciones de ácidos grasos no esterificados, siendo menores en el grupo sometido a estrés por calor e indicando una menor movilización de tejidos adiposos. De manera similar, en un estudio de Rhoads *et al.* [21] se evaluó la correlación entre la producción de leche y la cantidad de materia seca ingerida, experimentando con dos grupos de vacas equitativamente alimentadas y con solo uno de los grupos sometido a estrés por calor. La producción de leche en el grupo bajo estrés por calor fue menor que en el grupo en condiciones neutras de temperatura, llegando a la conclusión que el consumo de materia seca es responsable del 36% de los efectos en la producción de leche, mientras que el porcentaje restante se debe a otros factores como por ejemplo la nula movilización de tejido adiposo que debería de compensar los mecanismos de ahorro de glucosa para producción de leche.

2- Señales de estrés por calor en ganado lechero

Uno de los mecanismos utilizados por el ganado lechero para reducir su temperatura es el aumento en la tasa de respiración. El aumentar la tasa de respiración provoca que el animal expulse calor de su núcleo corporal, haciendo que el aire pase por el tracto respiratorio y mediante evaporación se refresque. Esta estrategia de refrescamiento suele ser el último recurso al que acude el ganado para evitar el calor severo [19].

Smith *et al.* [23] determinaron en su estudio (Cuadro 1) que el ganado vacuno comienza a presentar alteraciones en su tasa de respiración en cuanto el ITH se ubica cerca del rango límite entre 68 y 72, con 60 respiraciones por minuto. En cuanto el ITH sube entre 72 y 79 un estrés moderado se visualiza y la tasa de respiración sube a 75 respiraciones por minuto; mientras que en el rango de ITH entre 80 y 89 las respiraciones por minuto llegan a 85. Para valores de ITH más altos, el estrés por calor se puede considerar severo y la tasa de respiración llega a entre 120 y 140 respiraciones por minuto. En el mismo estudio se evaluaron también las temperaturas rectales, obteniéndose valores de 38,5 °C para los rangos más bajos de ITH hasta 41 °C para los rangos superiores.

Cuadro 1. Relación del ITH con la tasa de respiración y la temperatura rectal en ganado vacuno [23]

ITH	Tasa de respiración (respiraciones por minuto)	Temperatura rectal, °C
68-72	60	38,5
72-79	75	> 39
80-89	85	> 40
90-99	120-140	> 41

Sin embargo, hay otras señales que le pueden indicar a los encargados del hato que las vacas se encuentran en un estado de estrés por calor. Una de estas señales es la ubicación que adopta el ganado dentro del corral, o incluso el movimiento que realizan. En condiciones que provoquen estrés por calor, las vacas tenderán a desplazarse hacia los sitios más fríos del corral, provocando incluso que se muevan en grupo hacia zonas con sombra o cerca de las fuentes de agua [24]. Una forma en que esto ha sido

estudiado, es evaluando la preferencia de los animales ante distintas alternativas de ambientes. En este sentido, Schütz *et al.* [24] determinaron en su estudio que la necesidad de sombra durante los días calientes es relativamente alta, tomando en cuenta que las vacas expuestas a altas temperaturas preferirían permanecer de pie en un espacio con sombra, que permanecer acostadas en sitios sin protección ante la radiación, aún cuando se les privaba de espacio para echarse por más de 12 horas. El resultado anterior puede ligarse también con otros estudios en que se ha concluido que las vacas lecheras pasan hasta 2,6 horas más en los lugares que son provistos con sistemas de manejo de estrés por calor, como lo son espacios dotados con aspersores de agua. Sin embargo, esto ha incrementado también el riesgo de accidentes debido a pisos de concreto mojados [25].

3- Índice de temperatura-humedad

3.1- Factores ambientales

Como se mencionó anteriormente, el estrés por calor es causado por distintos factores ambientales que afectan la habilidad del ganado lechero para termo-regular su temperatura interna. Entre estos factores ambientales los principales son la temperatura del aire, la humedad relativa, la radiación solar, la velocidad del viento y la precipitación. Sin embargo, por una cuestión de facilidad en la disponibilidad de datos en finca y su impacto sobre el estrés causado, los factores ambientales que más se toman en cuenta son la temperatura del aire y la humedad relativa [26].

En este sentido, el ITH se presenta como un valor único que cuantifica los efectos combinados de la temperatura del aire y la humedad relativa del mismo. Estos factores ambientales son los principales implicados en el nivel de estrés generado en las vacas lecheras ya que la humedad relativa tiene un impacto directo en la tasa de calor que los animales son capaces de expulsar al ambiente a través de su piel y pulmones (mediante la respiración). Por otro lado, la temperatura del aire se vuelve más importante en tanto la humedad del ambiente aumenta también [14].

Distintas fórmulas han sido propuestas por algunos autores para calcular el ITH. Entre ellas, suelen variar las condiciones ambientales en que fueron hechos los estudios o el peso que se le da al efecto sobre el estrés de los factores ambientales implicados. En el Cuadro 2 se especifican cuatro fórmulas distintas para el cálculo de ITH con sus respectivos autores. En las fórmulas mostradas T_a es la temperatura del aire, T_{bs} es la temperatura del bulbo seco (°C), T_{pr} es la temperatura del punto de rocío (°C), T_{bh} es la temperatura de bulbo húmedo (°C) y HR es la humedad relativa del aire (%).

Cuadro 2. Modelos propuestos para el cálculo del ITH

	Modelo	Fuente
ITH ¹	$THI = (0.35 \times T_a + 0.65 \times T_{bh}) \times 1.8 + 32$	[27]
ITH ²	$THI = (1.8 \times T_a + 32) - [(0.55 - 0.0055 \times HR) \times (1.8 \times T_a - 26)]$	[28]
ITH ³	$THI = T_a + 0.36 \times T_{pr} + 49.5$	[28]
ITH ⁴	$THI = T_a + 0.36 \times T_{pr} + 41.5$	[29]

3.2- Límite de ITH

Como se dijo anteriormente, el ITH representa un valor numérico que combina los efectos de la temperatura del aire y la humedad relativa en el nivel de estrés por calor que puede estar experimentando el ganado lechero. Tradicionalmente se ha considerado un ITH de 72 como el límite mínimo en que el ganado comienza a sufrir consecuencias por calor. Sin embargo, Zimbelman *et al.* [30] cuestionaron este valor en su estudio y determinaron que un valor más apropiado para las vacas actuales con alta producción de leche podría ser 68, ya que el límite previamente mencionado de 72 tomaba en cuenta vacas con producciones de 15,5 kilogramos de leche por día, en contraste con las vacas Holstein de 35 kilogramos de leche por día que ellos evaluaron y que se asemejaban más a las vacas que se suelen tener en fincas lecheras hoy en día. El hallazgo anterior fue respaldado con lo encontrado en el estudio previo de Berman [31] en donde se concluía que las vacas con niveles de producción más altos también eran las que producían más calor, haciéndolas más sensibles a sufrir los efectos del estrés por calor.

Como puede notarse, el límite de ITH en que comienzan a presentarse efectos adversos sobre el ganado lechero es todavía hoy en día ampliamente debatido. Es por ello por lo que muchos estudios recientes se enfocan en establecer este límite bajo distintas condiciones, tomando en cuenta variables como la localización del estudio y las razas de las vacas analizadas. También, para identificar los límites de ITH en los que las vacas comienzan a sufrir las consecuencias del estrés por calor se han utilizado distintos parámetros, siendo la producción general de leche el más común. Sin embargo, otros parámetros utilizados han sido el rendimiento de la proteína contenida en la leche, la grasa o la temperatura rectal [26].

En el Cuadro 3 se presenta un resumen de las conclusiones a las que se llegó en diversos estudios en cuanto al límite de ITH. Se indica también la localización del estudio y la raza de las vacas analizadas, utilizando en todos los estudios la segunda fórmula contenida en el Cuadro 2.

Cuadro 3. Límites de ITH determinados en distintos estudios. Tomado de [26]

Fuente	Límite de ITH	Parámetro físico utilizado para identificación	Raza de las vacas	Localización
[32]	72	Producción de leche	Holstein	Arizona, Estados Unidos
[33]	72	Producción de leche y proteína	Holstein	Georgia, Estados Unidos
[34]	72-76	Producción de leche	Holstein	Norte y Sur de Estados Unidos
[12]	72	Producción de leche	Holstein USA	Georgia, Estados Unidos
[12]	74	Producción de leche	Holstein USA	Arizona, Estados Unidos
[35]	72	Producción de leche	Vacas eslovacas y Holstein	Sur de Eslovaquia
[36]	78.2	Temperatura rectal	Holstein	Florida, Estados Unidos
[37]	68	Producción de leche	Holstein	Arizona, Estados Unidos
[38]	60	Producción de leche	Holstein	Alemania
[39]	62	Producción de leche, proteína y grasa	Holstein	Luxemburgo

Fuente	Límite de ITH	Parámetro físico utilizado para identificación	Raza de las vacas	Localización
[40]	73-76 65-71 72-73	<ul style="list-style-type: none"> ○ Producción de leche ○ Porcentaje de proteína ○ Producción de proteína 	Holstein italiano	Cremona, Italia

Como puede notarse, la mayoría de los estudios de este tipo se han concentrado en analizar el comportamiento ante el estrés por calor de vacas raza Holstein en zonas templadas, por lo que los datos para otras razas en distintas latitudes del planeta suelen ser más escasos y el establecimiento de un límite de ITH se torna más difícil para condiciones diferentes a las citadas.

Por otro lado, en contraposición a las vacas Holstein se encuentran las vacas Jersey, las cuales suelen diferenciarse de las otras razas debido a una mayor adaptación a los distintos climas. Además, esta raza de vacas cuenta con pelajes de color variable, desde el café claro hasta el negro; así como características de alta fertilidad y capacidad de conversión de alimento en leche, llegando a ser hasta un 30 % más eficientes en dicha conversión, al ser comparada con otras razas lecheras. Su peso en edad adulta oscila entre 350 y 500 kg. La vaca Jersey es muy resistente al estrés por calor, por lo que la disminución en su producción de leche suele comenzar con temperaturas de 5 °C por encima que el límite en otras razas lecheras [41].

4- Efectos del estrés por calor en vacas lecheras

El estudio del estrés por calor en el ganado lechero ha tendido muchas veces a enfocarse en las vacas lactantes, debido principalmente a que son las que producen mayor calor metabólico y a que su nivel de estrés puede impactar directamente en las finanzas de la finca a corto plazo de una forma negativa. Sin embargo, varios estudios han decidido poner el foco de atención también en las vacas secas, vacas jóvenes o incluso terneras; que igualmente pueden sufrir consecuencias negativas ante condiciones climáticas adversas.

En el caso de las vacas en lactancia, Zimbelman *et al.* [37] determinaron que la producción de leche en vacas Holstein decrecía en 2,2 kg diarios cada vez que las vacas pasaban alrededor de 24 horas con un ITH superior a 68. Por su parte, West [17] indicó en su estudio que el estrés por calor no solo afectaba la producción de leche en las vacas, sino que también provocaba problemas de salud, desordenes metabólicos y problemas en la calidad de la leche. Este último atestado es respaldado por Collier *et al.* [42] quienes aseguran que la producción de proteína en la leche se ve afectada negativamente con la temperatura ambiente, disminuyendo la proteína en leche conforme la temperatura ambiental sube. En general, Mayer *et al.* [43] determinaron que la relación entre ITH y producción de leche puede ser de tres formas distintas: lineal, exponencial o constante hasta cierto punto, para luego decrecer linealmente en tanto el ITH crece. Igono *et al.* [32] encontró una relación lineal o curvilínea, mientras que Ravagnolo *et al.* [44] coincidió con el comportamiento lineal al principio y el decrecimiento posterior.

Como se mencionó, el estrés por calor también afecta a las vacas en otro estado que no sea el de lactancia. En el caso de las vacas secas, por ejemplo, Tao *et al.* [45] descubrieron que el calor tenía un efecto adverso sobre la tasa de crecimiento de células mamarias epiteliales, lo que ocasionaba una disminución de hasta 15% aproximadamente en la producción de leche diaria en las lactancias siguientes, por lo que se recomendaba utilizar estrategias de reducción de calor en esta población también. Asimismo, las terneras sufren las consecuencias del estrés por calor, ya sea directa o indirectamente. Este es el caso planteado por Nardone *et al.* [46], en donde demostró en su experimento que las vacas sometidas a condiciones de estrés por calor proporcionaban una calidad de calostro menor, por lo que habían repercusiones en la inmunidad y la tasa de crecimiento de las terneras.

Finalmente, es importante tomar en cuenta el efecto que tiene el estrés por calor sobre la fertilidad del ganado lechero. En este sentido, Jordan [47] menciona que el estrés por calor repercute negativamente en varios aspectos, como por ejemplo: la duración del estro de las vacas, la tasa de concepción, la función uterina, el estado endocrino, el desarrollo temprano embrionario y el crecimiento fetal. En el caso de las primeras dos, la tasa de concepción suele bajar en la época de verano debido a que el calor causa una disminución en la duración del estro de las vacas, haciendo que sea más difícil la detección del celo y por consiguiente inseminarlas en el momento adecuado [11].

5- Estrategias para reducción de estrés por calor

Existen numerosas estrategias que se emplean en las fincas lecheras para disminuir el estrés por calor que experimentan las vacas. Sin embargo, para entender el funcionamiento de cada una de ellas es necesario entender primero las vías que utilizan las vacas para perder calor. Las principales vías de termorregulación en el ganado lechero se basan en los principios de la conducción, la convección, la radiación y la evaporación; en donde las vacas mantienen una temperatura corporal mayor que la temperatura ambiente de forma tal que el flujo de calor sea hacia el exterior. Las primeras tres vías mencionadas requieren de un gradiente térmico para funcionar; es decir, se requiere de una diferencia de temperaturas entre el ambiente y el animal para que funcione. Por su parte, la pérdida de calor a través de la evaporación requiere de un gradiente de presión de vapor y es especialmente importante en condiciones en que la temperatura ambiental se acerca a la temperatura corporal de la vaca ya que se vuelve su única vía de pérdida de calor. Por otro lado, cuando la temperatura ambiental es mayor que la temperatura corporal del ganado, este flujo de calor se revierte y el animal se convierte en un sumidero de calor [48]. En la Figura 2 se muestra un resumen de las principales vías de pérdidas de calor y estrategias que se utilizan con cada una de ellas.

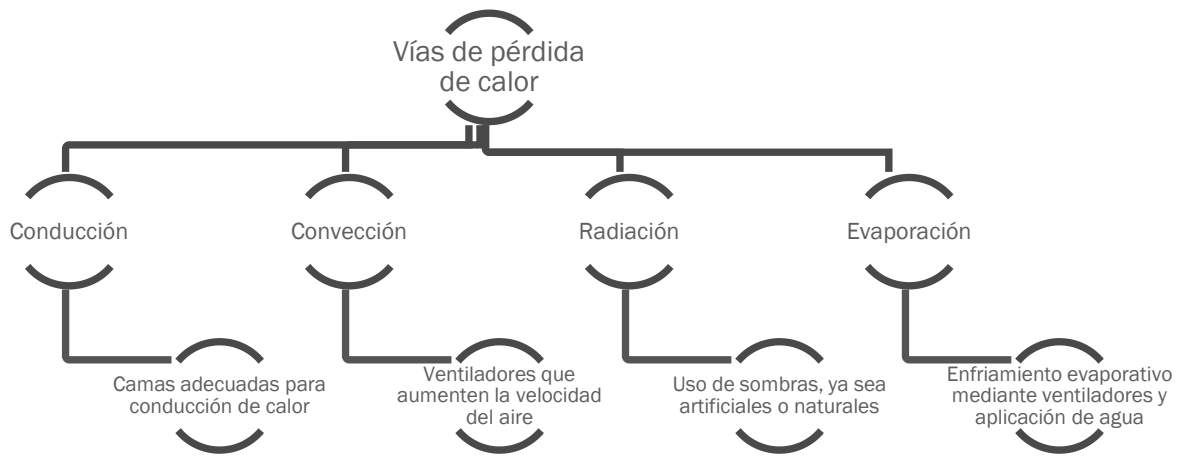


Figura 2. Principales vías de pérdida de calor y estrategia utilizadas en las fincas lecheras

En el caso de la pérdida de calor por conducción, se utiliza la diferencia de temperaturas entre dos superficies en contacto directo para que el flujo de calor pase del más caliente al más frío, influyendo también la conductividad térmica del material de las superficies y el área de contacto [49]. Un tipo de estrategia que utiliza este principio son las camas para ganado que se usan en las fincas para que las vacas se echen. Estas camas pueden ser de materiales como arena las cuales han sido probadas que mejoran el flujo de calor y funcionan como estrategia de mitigación de estrés por calor, incluso mejor que otros materiales como paja y alfombras hechas con gránulos de goma [50].

La vía de la convección mueve el calor del cuerpo de la vaca hacia el aire, aprovechándose de capas de aire fresco que al entrar en contacto con el cuerpo caliente de la vaca, absorben su calor y ascienden [49]. La principal estrategia para la mitigación

del estrés por calor que utiliza este principio es el uso de ventiladores, los cuales generan las capas de aire fresco que extraerán el calor del cuerpo de las vacas, y que tendrá un efecto mucho mayor en tanto la temperatura del aire suministrado sea menor [49].

El intercambio de calor por radiación se da principalmente por la emisión de calor proveniente del sol, lo que se conoce como radiación directa. Estrategias para combatir este tipo de mecanismo de ganancia de calor es el uso de estructuras que proporcionen sombra en los establos, ya sea mediante edificaciones como techos o mediante la colocación de textiles o incluso sombras naturales con la plantación de árboles; que brinden al ganado una barrera contra la incidencia directa de los rayos solares [51].

Finalmente, la última vía para la disipación de calor por parte de los animales es la evaporación. La evaporación es considerada el mecanismo primario para combatir el estrés por calor, siendo especialmente eficiente en climas secos y calientes. Esta vía de pérdida de calor se presenta en las vacas principalmente mediante el jadeo y la sudoración [49]. La pérdida de calor mediante evaporación se da en el ganado lechero cuando este suda y la evaporación de este sudor enfría a la vaca, siendo este enfriamiento acelerado en el momento en que la velocidad del aire alrededor de la vaca se incrementa. Otro factor que puede incrementar la pérdida de calor mediante esta vía es la aplicación de agua en el cuerpo de los animales, que junto con la ayuda de mecanismos que incrementan la velocidad del aire, harán que la evaporación de esta agua se dé más rápido y por ende la sensación de refrescamiento en el animal. Sin embargo, la eficiencia de esta estrategia depende también en gran medida de la humedad relativa del ambiente, ya que conforme la humedad relativa del ambiente

aumenta, se hace más difícil que el proceso de evaporación se dé debido a la presencia de más vapor de agua en el ambiente inmediato del animal [52].

5.1- Ventajas y desventajas de las distintas estrategias de mitigación de calor

La provisión de sombra en las fincas lecheras es una de las formas más económicas y fáciles de combatir el estrés por calor en el ganado. Esta sombra puede proveerse mediante el uso de techos, árboles o telas sintéticas que reduzcan la incidencia de la radiación solar en los distintos espacios de la finca. Según Armstrong [53], es recomendable instalar sombras con una orientación norte-sur, de forma tal que los rayos solares en su recorrido de este-oeste puedan igualmente secar el suelo que se encuentra debajo de la sombra. Tucker *et al.* [51] determinaron en su estudio que las vacas que recibían más protección contra la radiación solar presentaban menor temperatura corporal. También encontraron que el ganado buscaba ocupar las áreas del establo con mayor porcentaje de sombra, al mismo tiempo que usaban incluso estas áreas en días que la incidencia solar era relativamente baja, exaltando la importancia de tener acceso a dichas estructuras a lo largo de todos los días de verano.

Aun así, para la mitigación de los efectos del estrés por calor a veces no es suficiente con el uso de sombras que limiten la exposición a la radiación solar, y se requiere estrategias de enfriamiento adicional. Debido a esto, se utilizan mecanismos que modifiquen ya sea la temperatura o la velocidad del viento, así como la humedad relativa del ambiente. Normalmente, en ambientes con altas humedades relativas, los sistemas

de enfriamiento evaporativo son menos eficientes debido a las razones expuestas en el apartado anterior, por lo que estos sistemas suelen preferirse en zonas con climas áridos. En cambio, el uso de ventilación sí es una práctica que se aplica mejor en todo tipo de ambientes y puede ser ya sea natural o mecánica. En el caso de la ventilación natural se utilizan diseños con espacios abiertos que permitan el libre flujo del aire, y su efectividad depende de la velocidad del viento, la dirección y la temperatura de este. La ventilación mecánica por su parte puede funcionar con presiones positivas, negativas o una combinación de ambas; es decir, sistemas que funcionan con presiones positivas empujan el aire hacia dentro del espacio en donde se instala, mientras que los que funcionan con presiones negativas succionan el aire interior del espacio y lo sacan al exterior [54].

En los casos donde la temperatura del aire se incrementa es donde se suelen utilizar sistemas que combinan la ventilación con la aplicación de agua, ya sea directamente sobre el animal o en el aire circundante. Flamenbaum *et al.* [8] determinaron que las vacas que eran enfriadas mediante la aplicación de agua sobre ellas 5 veces al día por un espacio de tiempo de 30 minutos, mantenían temperaturas rectales entre 38,2 y 38,9 °C; las cuales eran significativamente menores que las de las vacas que no eran enfriadas. No obstante, en este tipo de sistemas se debe de considerar el costo económico que conlleva el consumo de agua para enfriamiento de los animales. Es por esto también que algunos sistemas de este tipo realizan aplicaciones de agua en intervalos de tiempo reducidos, para disminuir el consumo de agua. Otra estrategia que se utiliza es la de reducir el tamaño de la gota. Lin *et al.* [55] determinaron que el uso de nebulizadores en vez de aspersores podía reducir hasta en 10 veces el consumo de agua

para el enfriamiento de las vacas, teniendo ambos sistemas resultados similares en cuanto a la reducción de la tasa de respiración y el consumo de materia seca. Sin embargo, era necesario considerar que en el caso en que se usaran nebulizadores, el agua atravesara el pelaje y llegara hasta la piel, ya que de lo contrario el agua nebulizada formaría un tipo de aislante sobre el pelaje que impediría la salida de calor, siendo contraproducente con lo que se quería lograr.

Por otro lado, en los métodos en que se prefiere enfriar el ambiente alrededor de la vaca, se pueden utilizar almohadillas de enfriamiento que, en conjunto con la ventilación proporcionada, bajan la temperatura del aire que reciben las vacas; o bien los sistemas mencionados anteriormente de nebulizadores con ventilación mecánica, pero esta vez utilizando tamaños de gota aún menores, las cuales se evaporan rápidamente conforme se mueven en el aire del establo. En este sentido, las investigaciones hechas sobre la materia, indican que en tanto el tamaño de las gotas aumenta, también aumenta el tiempo que tardan en evaporarse [56]. También, es necesario considerar que las humedades relativas del lugar aumentarán con esta aplicación de agua, lo que genera que el sistema no sea recomendable en lugares que por sí solos presentan humedades relativas altas, ya que conforme aumenta la humedad relativa, se hace más difícil enfriar el ambiente [23]. Dicho esto, se debe de tener en consideración el balance existente entre el enfriamiento del aire que puede otorgar un sistema de este tipo, con la dificultad para evaporar agua de la piel del animal con humedades relativas más altas; por lo que surge la necesidad de procurar que dicho balance sea positivo y no vaya a generar en cambio un aumento del estrés por calor por el mal manejo de estos principios.

6- Evaluación del estrés por calor en vacas lecheras utilizando datos de temperatura

Como se ha mencionado anteriormente, existen distintos métodos indirectos para evaluar el estrés por calor al que están expuestos los animales en las granjas. Entre estos métodos se pueden mencionar el conteo de las respiraciones por minuto, la ingesta de materia seca en los animales, la ubicación de estos dentro del corral o la temperatura de las vacas. En el caso de la medición de temperatura en las vacas, existen también diversas formas de medirla, ya sea que se midan temperaturas vaginales del animal, temperaturas rectales o temperaturas superficiales, por mencionar algunas. Estudios como el llevado a cabo por Tresoldi *et al.* [57] hacen uso de registradores de datos que se colocan intravaginalmente en las vacas y capturan datos de temperatura constantemente, con el fin de poder notar diferencias entre vacas expuestas a sistemas de enfriamiento y vacas que no. Por otro lado, estudios como el Brouk *et al.* [58] y el de Hillman *et al.* [59] también hicieron uso de termómetros infrarrojos para evaluar la temperatura superficial de la piel de las vacas, llevando a cabo mediciones en distintas zonas del cuerpo de los animales y notando como sistemas de aspersión de agua y ventilación lograban reducir entre 6 y 4 °C la temperatura superficial del ganado de leche, con mejores resultados en los tratamientos que tenían una frecuencia mayor de aplicación de agua. Sin embargo, sigue siendo una necesidad el diseñar sistemas que puedan analizar a gran escala estos u otros parámetros que distingan a las vacas en condición de estrés por calor, sin que aumente significativamente el tiempo de trabajo en las fincas.

Metodología

El experimento se llevó a cabo en el módulo lechero de la Estación Experimental Alfredo Volio Mata de la Universidad de Costa Rica, desde enero hasta mayo del 2020. La Estación se ubica en el distrito de San Rafael del cantón de La Unión, en Cartago, Costa Rica; con una latitud $09^{\circ}54'31.0''N$ y una longitud $83^{\circ}57'17.2''O$, a una altura de 1592 msnm. En el lugar se presenta una precipitación media anual de 1500 mm concentrados especialmente en la época lluviosa que comprende de mayo a noviembre; con una humedad relativa de 84 % y una temperatura media de $19,3^{\circ}C$ [60].

El trabajo de investigación se dividió en tres áreas principales de acción, la primera de ellas buscó una eficiente reducción de temperatura del ganado de leche, por lo que se basó en el diseño del sistema de aspersión y ventilación necesario en la sala de espera de la lechería. La segunda se basó en la medición del efecto del sistema sobre la producción de leche y el rendimiento reproductivo, y por último el análisis financiero de la implementación de este sistema en una finca lechera. La Figura 3 resume las áreas de trabajo previamente mencionadas, mientras que la Figura 4 se refiere a los períodos de tiempo en que se hicieron cada una de la toma de datos experimentales en sus distintas etapas, las cuales se detallan posteriormente en sus respectivos apartados.

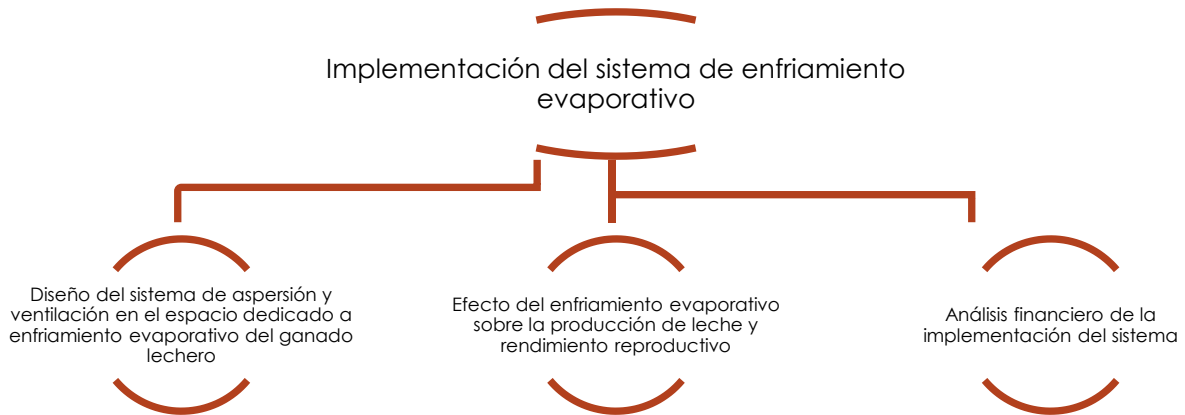


Figura 3. Ejes de trabajo del proyecto

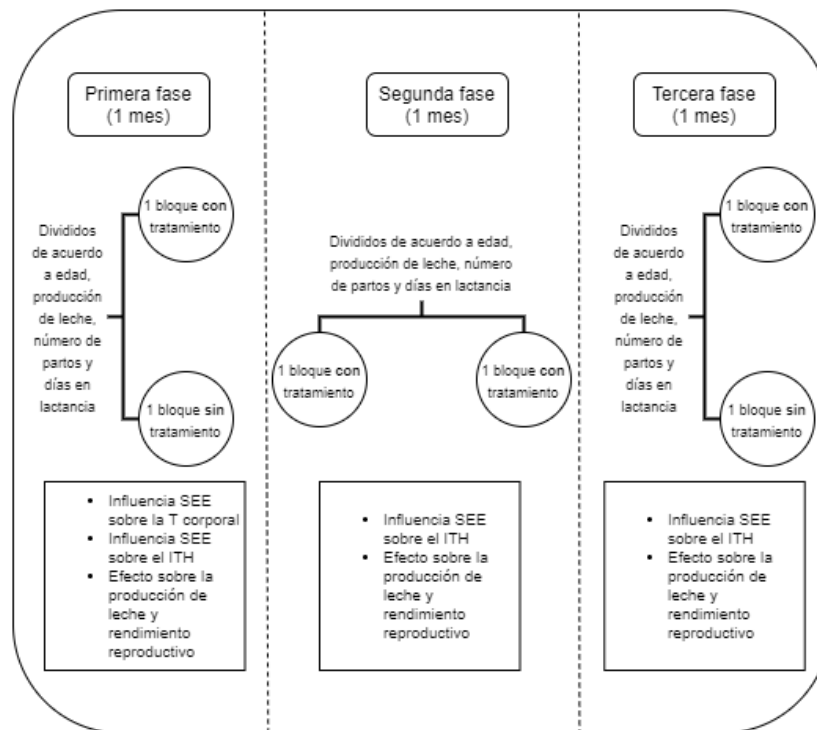


Figura 4. Toma de datos experimentales

Como se señala en la Figura anterior, el hato de vacas fue dividido en dos bloques homogéneos de 16 animales cada uno: Bloque A y Bloque B. Los criterios de clasificación fueron los días de lactancia (Bloque A = $619,9 \pm 95,1$; Bloque B = $619,6 \pm 90,5$), la producción de leche diaria en kilogramos (Bloque A = $16,4 \pm 2,7$; Bloque B = $17,6 \pm 3,6$), el número de partos (Bloque A = $2,6 \pm 1,5$; Bloque B = $2,6 \pm 1,0$) y la edad en años (Bloque A = $5,6 \pm 1,9$; Bloque B = $5,7 \pm 1,4$). Durante la primera etapa del experimento, el Bloque A estuvo expuesto al sistema de enfriamiento evaporativo mientras que el Bloque B se mantuvo por fuera de este. En la segunda etapa ambos bloques fueron expuestos al sistema de enfriamiento. Por último, en la tercera etapa, se cambió el orden y por ende el Bloque B se expuso al enfriamiento evaporativo mientras que el Bloque A se quedó por fuera. Cada una de las etapas tuvo una duración de un mes continuo de toma de datos evaluados diariamente, los cuales en conjunto se prolongaron a lo largo de la época seca en la Estación Experimental Alfredo Volio. Las vacas en ambos bloques fueron proveídas de una alimentación homogénea compuesta por los pastos de la Estación y raciones nutricionales sin ninguna clase de diferenciación entre bloques experimentales. Todas las vacas evaluadas durante el experimento fueron de la raza Jersey.

El hato de producción en la EEAVM se maneja mediante un sistema semi-estabulado con dos ordeños durante el día: uno en horas de la mañana y otro en horas de la tarde. En dicho experimento todas las evaluaciones se realizaron durante el ordeño de la tarde, tomando en cuenta la carga por calor a la que estaban expuestas los animales en horas de la mañana al permanecer en los potreros durante los momentos más calurosos del día. Al dividir el grupo en dos bloques, el primer grupo era expuesto al SEE en la sala de

espera por un período de 30 minutos antes de pasar a la sala de ordeño. Una vez se comenzaba el proceso de ordeño, las vacas eran mantenidas en este espacio bajo la influencia del SEE conforme fueran ordeñadas y hasta terminar con todo el grupo. Posteriormente, el segundo grupo era ingresado a la sala de espera con el SEE apagado y hasta terminar la operación de ordeño.

1- Diseño del sistema de aspersión y ventilación en el espacio dedicado a enfriamiento evaporativo del ganado lechero:

El diseño del sistema de enfriamiento evaporativo (SEE) se realizó tomando en cuenta las condiciones del espacio de la sala de espera de la lechería y las necesidades para el buen funcionamiento del enfriamiento (Figura 5). En este sentido, fue necesario hacer la apropiada selección de aspersores, el espaciamiento necesario entre ellos, su altura de funcionamiento y el caudal de aplicación de agua; de acuerdo con lo utilizado en sistemas de enfriamiento evaporativo similares y tomando en cuenta la presencia de viento generado por los ventiladores que se colocaron en el área. En cuanto al sistema de ventilación, se hizo la instalación de acuerdo con los criterios pertinentes de los ventiladores adquiridos en la EEAVM para tal fin.



Figura 5. Sala de espera previo y posterior a la instalación del SEE

Para la evaluación del sistema de aspersión se consideraron los volúmenes de agua recogidos por pluviómetros o recipientes pequeños de un cuarto de galón, colocados en cuadrícula cubriendo toda el área mojada por los aspersores, según la metodología descrita por Zúñiga [61]. Los recipientes utilizados se colocaron formando una cuadrícula con una distancia de 1 metro entre ellos según se observa en la Figura 6, y se puso a funcionar todo el sistema de enfriamiento evaporativo por el lapso de una hora exacta, para luego pesar el volumen de agua recogido en cada uno de los recipientes. Dicho procedimiento se repitió tres veces. Los resultados de los volúmenes recolectados se analizaron con el programa Catch 3D para obtener el coeficiente de uniformidad del riego aplicado con el sistema en funcionamiento. Paralelamente, se hicieron pruebas de velocidad de viento con un anemómetro marca Prova, modelo AVM-01.



Figura 6. Medición de coeficiente de uniformidad del riego aplicado

Para validar el funcionamiento del sistema instalado, se trabajó en dos vías: una evaluación de temperatura superficial sobre el cuerpo de las vacas y una evaluación ambiental en la sala de espera. Debido a esto, se midió la temperatura superficial de las vacas antes y después de su paso por la sala de espera; así como el valor de ITH en el mismo lugar. Las mediciones se llevaron a cabo durante el espacio de un mes en lo que se refiere a la temperatura superficial con toma de datos diarios sobre todas las vacas evaluadas, y 3 meses continuos en lo que se refiere al ITH de la sala de espera, con datos de temperatura y humedad relativas en intervalos de un minuto en el lapso entre 1:00 p. m. y 5:00 p. m. La fórmula utilizada para el cálculo del ITH fue la propuesta por Kelly y Bond [28], con su respectiva modificación para utilizar la temperatura en °C:

$$THI = 0,8 \cdot T + RH \cdot (T - 14,4) + 46,4 \quad [1]$$

donde T es la temperatura (°C) y HR es la humedad relativa (decimal).

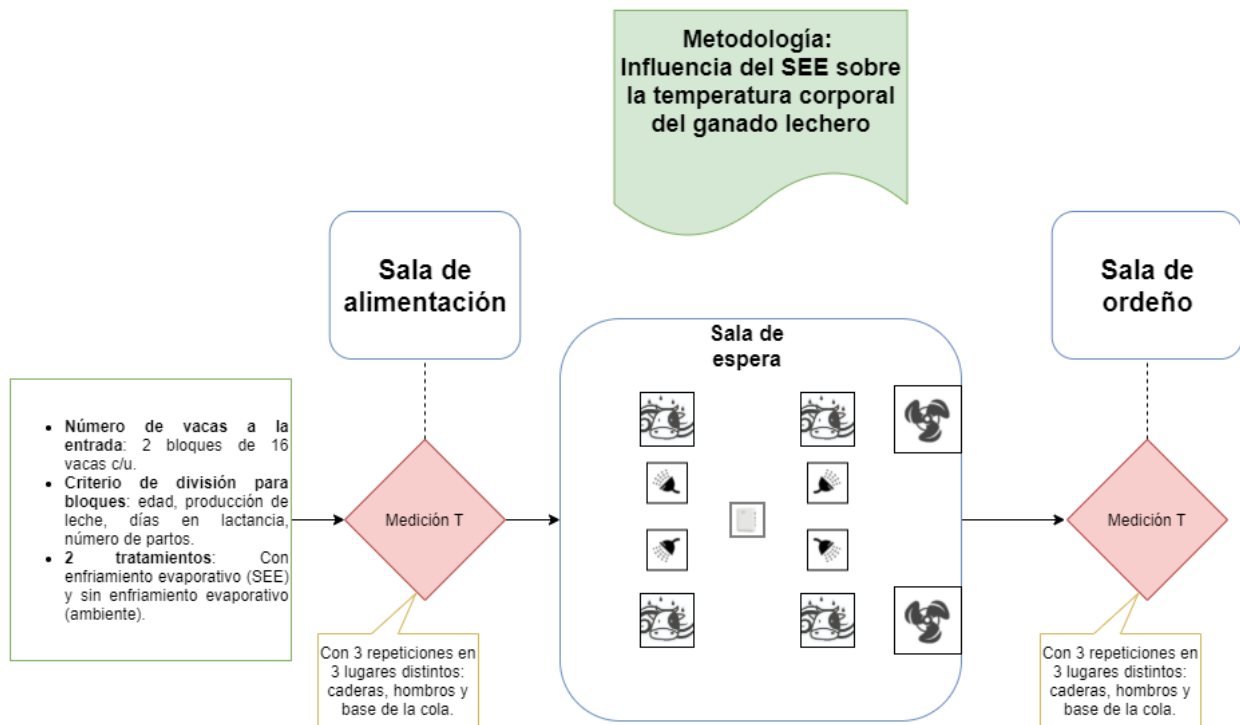


Figura 7. Diseño experimental para medición de temperatura superficial

Las mediciones de temperatura superficial se realizaron en la sala de alimentación previo a la entrada de la sala de espera en donde estuvo funcionando el sistema de enfriamiento evaporativo, y también mientras las vacas se encontraban en la sala de ordeño (Figura 7). El instrumento utilizado para hacer la toma de datos fue un termómetro infrarrojo Fluke-62 MAX ESPR, colocado a una distancia no mayor de 30 cm en áreas de la cadera, hombro y base de la cola [62], [63]. La emisividad utilizada como parámetro en el termómetro infrarrojo fue de 0,95; según lo recomendado por Poikalainen *et al.*[64]. La temperatura promedio de esas áreas se consideró como la temperatura superficial de la vaca [63]. Para evaluar las diferencias estadísticas observadas se utilizó estadística

descriptiva en todos los datos y posteriormente se aplicó la prueba T de Student para muestras emparejadas, con un nivel de significancia del 95 %. Asimismo, con el objetivo de corroborar los datos obtenidos, se tomaron también imágenes con una cámara compacta de imágenes térmicas modelo Flir E60.

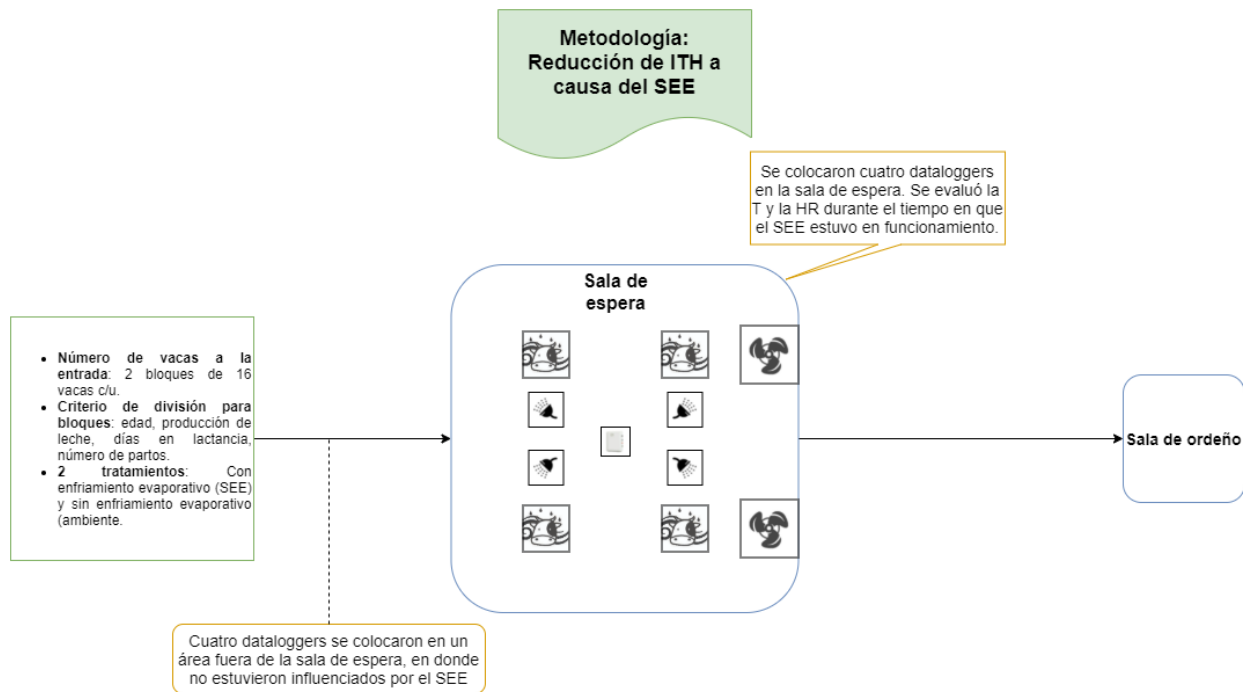


Figura 8. Diseño experimental para medición del ITH dentro de la sala de espera

Mientras tanto, a lo largo de todo el experimento se colocaron en la sala de espera dataloggers modelo HOBO MX1102A y HOBO MX2300 capaces de registrar datos de temperatura ambiental y humedad relativa, y con ello poder calcular el respectivo ITH (Figura 8). Los dataloggers se colocaron un metro por debajo del nivel del techo para evitar la interacción de las vacas con los equipos utilizados (ver Figura 9), tanto en el área influenciada por el sistema de enfriamiento evaporativo como en áreas que no eran influenciadas por el sistema. Se tomaron datos continuamente, incluyendo el tiempo

previo a la entrada de las vacas a la sala de espera y al comienzo del funcionamiento del sistema de enfriamiento evaporativo, con tal de poder observar posteriormente el cambio en el índice de Temperatura-Humedad debido a la utilización del sistema. Para el análisis de la diferencia de ITH entre el bloque que no era sometido al tratamiento de enfriamiento y el bloque que sí, se utilizaron los datos obtenidos durante media hora en las áreas donde se ubicaban cada uno de los bloques experimentales, ya fuera en la sala de espera con el sistema funcionando (ITH-SEE), o en un espacio con sombra artificial previo a la sala de espera (ITH-Ambiente). Estos datos fueron los comprendidos entre 2:50 p. m. y las 3:20 p. m.; momento en que el grupo de vacas expuesto al SEE se encontraba en la sala de espera previa a la sala de ordeño.



Figura 9. Colocación de Data Loggers en la sala de espera

Las variaciones en ITH entre los datos tomados como ITH ambiental y los influenciados por el SEE en la sala de espera se analizaron estadísticamente mediante un análisis de

varianza (ANOVA) de una vía, aplicando la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 95 %.

2- Efecto del sistema de enfriamiento evaporativo sobre la producción de leche y rendimiento reproductivo

El efecto del enfriamiento evaporativo se midió tomando en cuenta la producción de leche promedio de cada bloque experimental, así como su rendimiento reproductivo; es decir, número de servicios por concepción y número de días abiertos; durante todo el tiempo en que duró la toma de datos experimentales. En la Figura 10, se muestra un esquema más detallado de tal experimento:

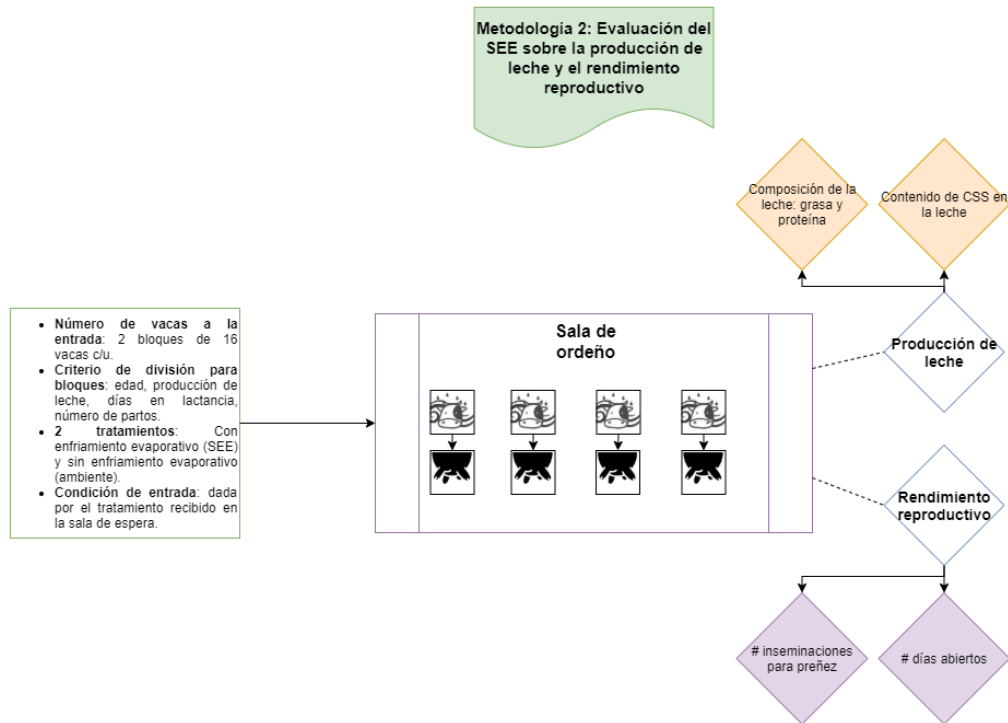


Figura 10. Diseño experimental para medición de la producción de leche y el rendimiento reproductivo

En cuanto a la producción de leche, el equipo automatizado de ordeño SCR Data Flow II de la EEAVM registró para cada vaca la cantidad en kilogramos de leche producida diariamente por turno, ya fuera este en el turno de la mañana o en el turno de la tarde, según la práctica usual de ordeño en la Estación. Adicionalmente, se tomaron muestras de leche en cada turno al menos una vez a la semana durante toda la duración del experimento. Estas muestras fueron analizadas con un analizador de leche modelo Milkoscan Minor y se determinó su composición en cuanto a grasa y proteína, haciendo la respectiva división por tratamiento recibido de los grupos de vacas (Figura 11). Para el análisis de los resultados, se utilizó un modelo lineal mixto (MLM) mediante la herramienta informática SAS, en donde se tomó como variable aleatoria a cada una de las vacas que conformaban el bloque experimental.



Figura 11. Separación de muestras para análisis de composición de leche

Asimismo, para descartar la posibilidad de aparición de mastitis en el hato debido a la humedad a las que estarían sometidas las vacas durante el experimento, se realizaron conteos de células somáticas (CCS) en las vacas durante el primer mes del experimento. La toma de muestras para dichos análisis se hizo una vez a la semana y se enviaron las muestras a los laboratorios de la Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos. Los datos recopilados de células somáticas se transformaron aplicando un logaritmo en base 10 para obtener una escala comparable, ya que estos no siguen una distribución normal [65].

Para determinar el rendimiento reproductivo, se comparó el número de servicios por concepción del ganado lechero; esto es, cuántas veces se inseminó antes de quedar efectivamente preñada. Adicionalmente, se cuantificó el efecto sobre el número de días abiertos; es decir, el período de días entre el momento en que la vaca parió y volvió a ser preñada. A los datos obtenidos de rendimiento reproductivo se les aplicó la prueba T de Student para muestras emparejadas con el fin de observar las diferencias entre el grupo expuesto al SEE y aquel que no lo estuvo.

3- Análisis financiero de la implementación del sistema

La viabilidad financiera de la instalación del sistema determina en gran medida la adopción de dicha tecnología en fincas lecheras de Costa Rica. Es por esto por lo que, durante toda la duración del proyecto, se registraron los costos de inversión, operativos y de mantenimiento que conlleva el funcionamiento del sistema. También, se hicieron proyecciones de acuerdo con los resultados de los apartados anteriores de los posibles

ingresos por concepto de aumento en la producción de leche y mejora en el rendimiento reproductivo.

En esta sección del trabajo se tomaron en cuenta los gastos que tendría una finca lechera típica para implementar el sistema de enfriamiento evaporativo; y no las condiciones especiales que tiene la EEAVM por ser parte de la Universidad de Costa Rica, como por ejemplo exenciones de impuestos, disponibilidad de materiales, mano de obra con regímenes de salarios para empleados públicos, entre otras.

Con proyecciones basadas en los resultados obtenidos en la sección anterior, se hizo el análisis financiero que pudiese determinar el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR), el período de recuperación de la inversión (PR) y la relación costo beneficio del proyecto; bajo dos distintos escenarios: el escenario experimental y el escenario teórico. Los cálculos se presentan para una tasa de descuento referencia del 12 % [66], así como para una tasa de descuento del 8,3 % también de referencia [67].

En este caso, el escenario denominado como experimental se basó en los resultados obtenidos en la subsección 2 de este apartado. De estos resultados se tomaron en cuenta básicamente el efecto en la producción de leche y también estimaciones de posibles beneficios económicos a causa del cambio en el número de días abiertos y en el número de inseminaciones en las vacas.

En cuanto al escenario denominado teórico, se utilizaron los resultados de la subsección “Reducción del ITH a causa del SEE”, específicamente el valor de la disminución de ITH alcanzado en la sala de espera a causa de la instalación del SEE en este lugar. Este

valor se utilizó en la Ecuación 2 presentada por St-Pierre *et al.* [68] para cuantificar la pérdida en la producción diaria de leche a causa del estrés por calor. La ecuación mencionada es la siguiente:

$$LECHE_{reducción} \left[\frac{lb}{vacas - día} \right] = 0,00638 \cdot (ITH_{max} - ITH_{lim})^2 \cdot horas\ de\ estrés\ por\ calor \quad [2]$$

donde ITH_{max} es el ITH más alto experimentado durante el día y las horas de estrés calórico se cuantifican como las horas en que el ITH estuvo por encima del límite, el cual puede variar de acuerdo con la fuente consultada. Sin embargo, para este estudio, se presentan las estimaciones para un límite de ITH fijado en 72, así como demostraciones con 3 valores más altos de ITH ($ITH_{lim} = 74$, $ITH_{lim} = 76$, $ITH_{lim} = 78$). Las horas de estrés por calor se fijaron para todos los casos analizados en 4,5 horas por día, tomando en cuenta los datos observados a lo largo del tiempo en que se desarrolló el experimento en la EEAVM. El número de animales en el hato de producción para hacer la estimación financiera se fijó en 50 vacas, y el período de estrés por calor al que estarían sometidas sería equivalente a 4 meses. Para estas estimaciones no se toman en cuenta posibles efectos en los cambios de sus rendimientos reproductivos.

Para ambos casos analizados se tomaron en cuenta los costos de inversión para la instalación del SEE, así como el costo de operación y mantenimiento anual. En cuanto al costo de operación, se tomó en cuenta el costo que implicaba tener en funcionamiento el sistema por un espacio de dos horas, lo que contempla un tiempo de media hora en la sala de espera previo a la entrada de las vacas a la sala de ordeño, así como hora y media para todo el proceso de ordeño donde las vacas ingresan paulatinamente.

Resultados y discusión

1- Diseño del sistema de enfriamiento evaporativo para ganado lechero

1.1- Instalación del sistema de enfriamiento evaporativo

El sistema de enfriamiento evaporativo (SEE) instalado en la EEAVM se compone principalmente de dos subsistemas: el sistema de ventilación mecánica y el sistema de aspersión de agua.

El sistema de enfriamiento evaporativo se instaló en la sala de espera de la lechería, ubicada justo antes de la entrada a la sala de ordeño (Figura 12). El espacio es un espacio con dimensiones de 10,5 x 9,85 m. El área es un área abierta, acordonada por muros de concreto de 1,5 m de alto y techado completamente, con alfombras antideslizantes y desagües para la correcta evacuación del exceso de agua (Figura 13). Posterior a la sala de ordeño, se encuentra un patio de salida con las mismas características constructivas, con la diferencia de que esta área no fue sometida a los efectos del sistema de enfriamiento, o los efectos fueron mínimos. La escogencia de este lugar para la colocación del SEE se basó en el hecho de que este es el lugar dentro del módulo de lechería en donde se pueden tener contenidos los animales por un período de tiempo más extendido (hasta una hora antes de pasar a la sala de ordeño), logrando bajar la carga de estrés por calor a la que han sido sometidas las vacas durante el día en los potreros. Además, la alta densidad animal que normalmente se presenta en la sala de espera y la conveniencia de utilizar los aspersores en el sitio de la lechería en donde no se podrían provocar riesgos en la salud del hato por la generación de

ambientes más húmedos también se consideraron, según recomendaciones hechas al respecto [69].

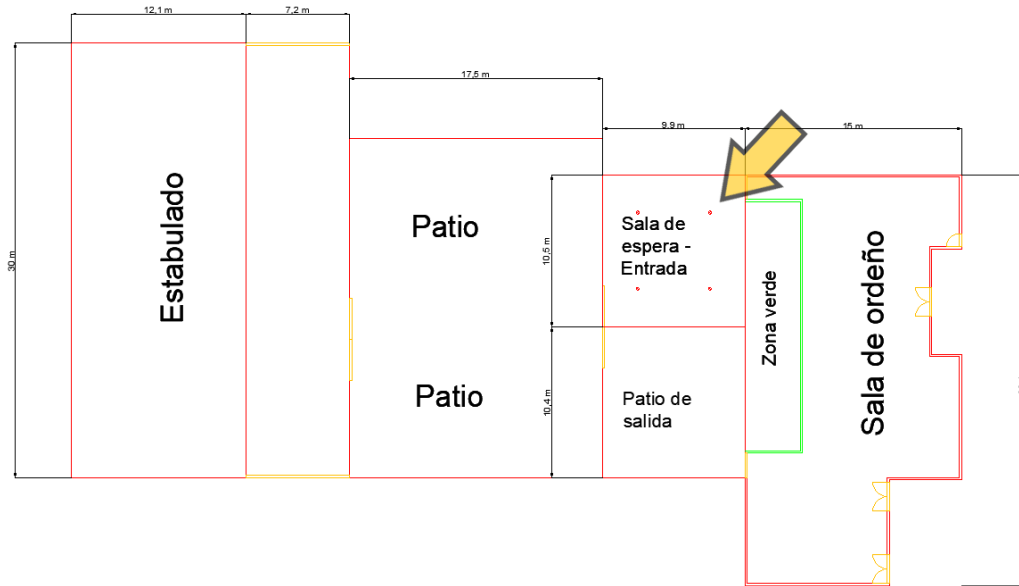


Figura 12. Ubicación de la sala de espera dentro del módulo de lechería



Figura 13. Detalle de la sala de espera donde fue ubicado el SEE

En lo que se refiere al sistema de ventilación, se hizo uso de dos ventiladores mecánicos adquiridos previamente en la Estación. Los ventiladores marca GEA de GEA Farm Technologies, modelo 5131-5200-020, son de 3 aspas de propela cada uno, con un tamaño de 52 pulgadas de diámetro (Figura 14). El motor de los ventiladores es de 1,5 caballos de fuerza, con una cubierta de acero galvanizado en todo el ventilador. Cada ventilador es capaz de empujar un caudal de aire de 26 700 pies cúbicos por minuto y hacer que el mismo alcance velocidades de 5,2 m/s a una distancia de 6,6 m.



Figura 14. Ventilador instalado en la sala de espera de la EEAVM

Los ventiladores fueron colocados en el costado norte de la sala de espera, a una distancia de 2,0 m del borde del muro con tal de acercarse más a la recomendación presentada en la Figura 15, aunque en el caso de la instalación hecha en la EEAVM y por las dimensiones del espacio, solo fue necesaria una fila de ventiladores. Los dos

ventiladores fueron colocados uno a la par del otro, a una distancia de 4,90 m entre ellos (Figura 16), con una altura libre de 2,0 m sobre el nivel del suelo y con un ángulo de inclinación de 30°. Para la alimentación eléctrica de los motores se utilizó la misma instalación eléctrica existente en la lechería, asignando un disyuntor específico para el encendido de ambos motores.



Figura 15. Distancia recomendada entre ventiladores [70]

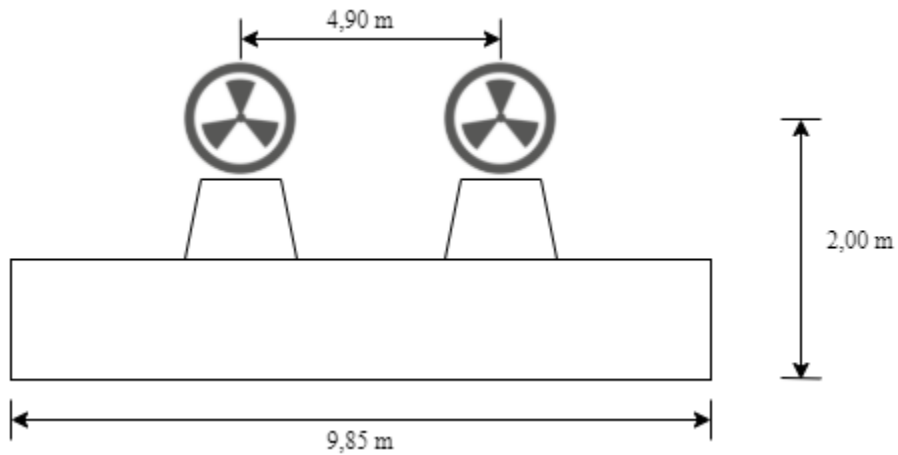


Figura 16. Detalle de la separación y altura de colocación de los ventiladores instalados

Para la evaluación del sistema de ventilación se midió la velocidad del viento en distintos puntos de la sala de espera, obteniéndose valores entre 2 y 3 m/s. Estos valores se consideran aceptables tomando como referencia las recomendaciones dadas en diversas fuentes, donde la velocidad recomendada ronda los valores entre 1 y 3,5 m/s

[70], [69], [71]. De igual manera, el caudal de viento recomendado según las mismas fuentes se estima en 1000 pies cúbicos por minuto por vaca, lo cual se considera adecuado para las operaciones normales de la EEAVM, tomando en cuenta que los ventiladores instalados en su conjunto tenían una capacidad de 53 400 pies cúbicos por minuto. Sin embargo, en términos de la metodología seguida para esta investigación, sí se considera un caudal alto ya que el hato en ordeño se dividiría en dos bloques y por lo tanto el área de estudio no sería ocupada por la totalidad de las vacas de la EEAVM.

Por su parte, el sistema de aspersión de agua se compone de 4 aspersores marca Azud con un caudal de descarga de 1,67 L/min y un radio de mojado de 3,75 m. La instalación de los aspersores se hizo en manguera de polietileno de 16 mm colocada de forma aérea sobre el techo de la estructura ya construida. La colocación se efectuó de tal forma que el agua abarcara toda la sala de espera, como se muestra en la Figura 17. El coeficiente de uniformidad obtenido al poner en funcionamiento todo el SEE fue de un 61 %, el cual es menor al 70 % recomendado [61]; sin embargo, para el tipo de sistema construido se considera aceptable tomando en cuenta las velocidades de viento involucradas en un espacio semi-abierto, así como el tamaño de las vacas en donde prácticamente no queda espacio dentro de la sala en donde no se esté expuesto al agua (Figura 18). La fuente de agua utilizada para el funcionamiento de los aspersores provenía de un tanque con agua potable previamente instalado para las distintas labores llevadas a cabo en la lechería.

En el Cuadro 4 se muestra un resumen de las características técnicas del equipo instalado, así como de dimensiones en el espacio en donde se instaló.

Cuadro 4. Generalidades técnicas del SEE instalado en la sala de espera

Sistema de ventilación	
Modelo:	5131-5200-020
Tamaño (pulgadas):	52
Cantidad de aspas:	3
Caudal de aire (pies cúbicos por metro):	26700
Motor:	Motor eléctrico 1Ph - 1,5 HP
Velocidad del viento a 6,6 m (m/s):	5,2
Sistema de aspersión	
Cantidad de aspersores:	4
Marca de aspersores:	Microaspersor Azud, boq. gris
Caudal de descarga por aspersor (L/min):	1,67
Radio de mojado (m):	3,75
Diámetro de manguera de polietileno (mm):	16
Sala de espera	
Tamaño (m ²):	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

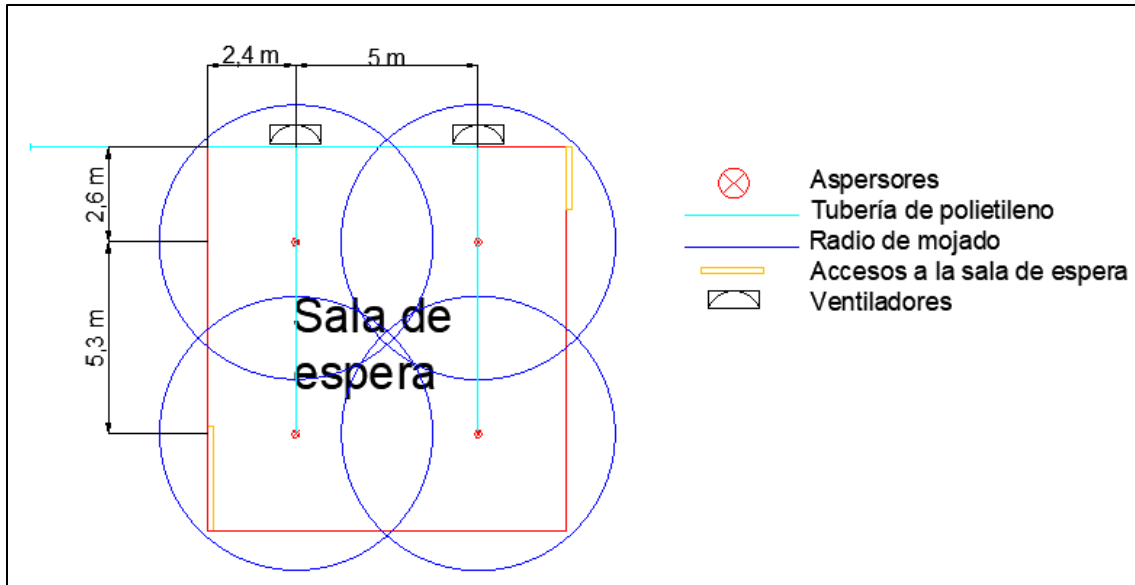


Figura 17. Disposición de los aspersores en la sala de espera



Figura 18. Área de influencia del SEE en la sala de espera

1.2- Reducción del ITH a causa del SEE

Para medir la eficiencia en la reducción del ITH a causa del SEE, se utilizaron data loggers que registraron los datos de temperatura y humedad relativa en dos espacios específicamente: uno influenciado por el SEE y otro al que se le llamó “ambiental” y no estaba influenciado por el SEE. A lo largo del experimento, se obtuvieron valores diarios máximos y mínimos de ITH en el área donde se colocó el SEE de 76,1 y 65,8; respectivamente. Por otro lado, en el área fuera de la influencia del SEE el valor diario de ITH máximo fue de 79,1 y el mínimo de 66,0 (Cuadro 5). En el Anexo 1 de este trabajo, se brinda el detalle específico de los datos de ITH captados diariamente, tomando en cuenta que todas las mediciones se realizaron durante la época seca en la EEAVM (específicamente entre los meses de enero y mayo), momento del año donde podían existir más posibilidades de condiciones ambientales que generaran estrés por calor en los animales.

Cuadro 5. Valores de ITH medidos

Días de evaluación	Ambiente	90
	SEE	90
Promedio	Ambiente	73,0
	SEE	70,1
Mediana	Ambiente	72,9
	SEE	70,0
Desviación estándar	Ambiente	3,10
	SEE	2,07

Mínimo	Ambiente	66,0
	SEE	65,8
Máximo	Ambiente	79,1
	SEE	76,1

En general, la reducción del ITH a causa del SEE en la sala de espera fue de 2,91 puntos ($p < 0,001$), lo que evidenció en gran medida la capacidad del sistema para reducir este parámetro. Sin embargo, es de destacar que los valores promedio de ITH obtenidos (SEE: 70,1; Ambiente: 73) a lo largo de todo el período de estudio se encontraban muy cercanos al límite de ITH comúnmente mencionado en la literatura para denotar las condiciones ambientales en que el ganado vacuno se somete a condiciones de estrés por calor (Figura 19). Este límite suele situarse en 72 para vacas con niveles de producción cercanos a los 15,5 kg/día, según Zimbelman *et al.* [30]. Aun así, cabe mencionar que la mayoría de estudios que estudian el valor límite de ITH lo hacen enfocándose en vacas raza Holstein, como se evidencia en diversas fuentes [12], [32], [33], [34].

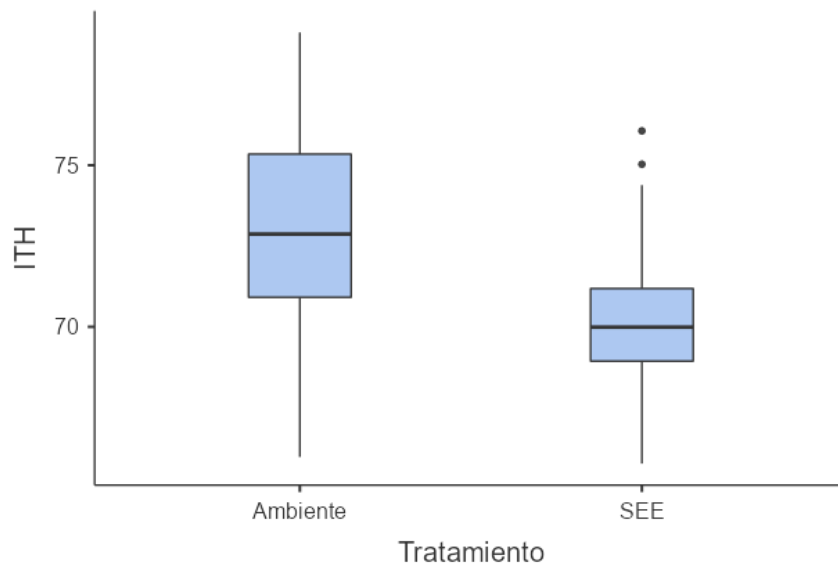


Figura 19. Reducción de ITH a causa del SEE

1.3- Influencia del SEE sobre la temperatura corporal del ganado lechero

La división del hato de vacas en dos bloques homogéneos permitió medir la influencia del SEE sobre la temperatura corporal del ganado. Mientras que el Bloque A estuvo expuesto al SEE colocado en la sala de espera, el Bloque B no fue expuesto a este. Para ambos bloques experimentales la temperatura fue medida en la sala de estabulado previa a la sala de espera, y posteriormente en la sala de ordeño; con el objetivo de cuantificar este cambio de temperaturas corporales. Las temperaturas corporales reportadas son el promedio de las temperaturas obtenidas en las zonas del cuerpo del animal citadas anteriormente (cadera, hombro y base de la cola); considerando también que al hacer los análisis previos no se presentaron diferencias significativas entre las temperaturas medidas en las distintas zonas.

En este sentido, el Bloque A expuesto al SEE registró diferencias significativas en su temperatura corporal con un valor promedio de 3,97 °C menos que la temperatura previa a la sala de espera ($p < 0,001$). Por otro lado, el Bloque B no registró diferencias significativas ($p < 0,536$) en su temperatura corporal antes y después de la sala de espera; lo cual coincide con lo esperado ya que como se mencionó, este bloque no fue expuesto al SEE. En la Figura 20 se expone lo mencionado tanto para el Bloque A como para el Bloque B, haciendo referencia a la temperatura antes y después de la sala de espera en donde estaba colocado el SEE. Para el Bloque A la temperatura promedio antes del SEE fue de $33,7 \pm 0,0779$ °C y de $29,9 \pm 0,0724$ °C luego de su exposición al SEE; mientras que para el Bloque B fue de $33,4 \pm 0,0700$ °C y de $33,7 \pm 0,0850$ °C, respectivamente.

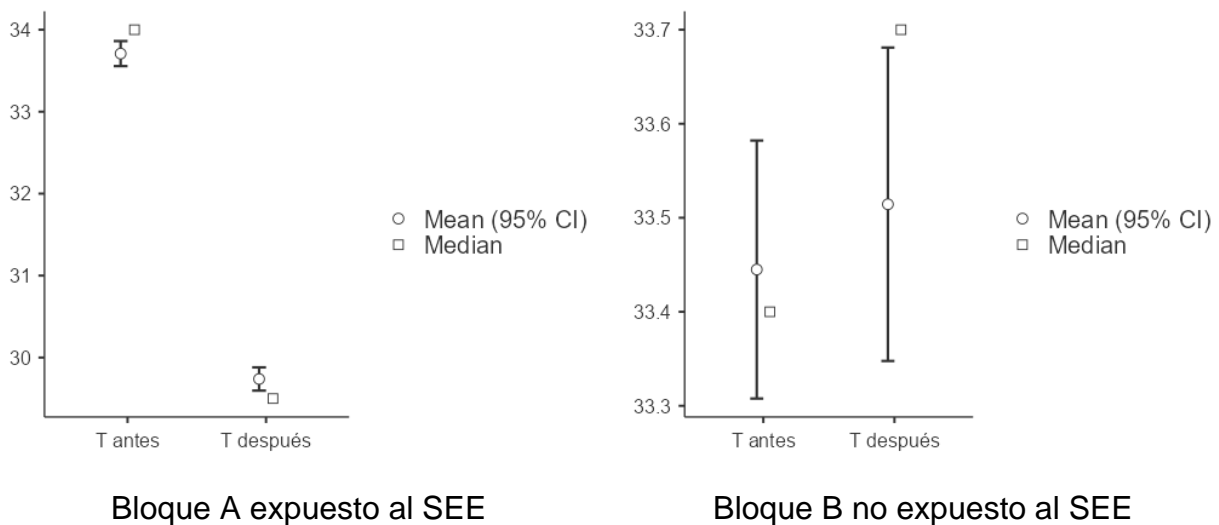
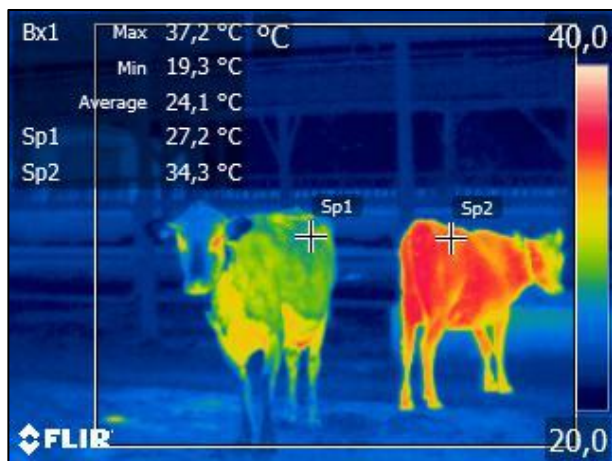
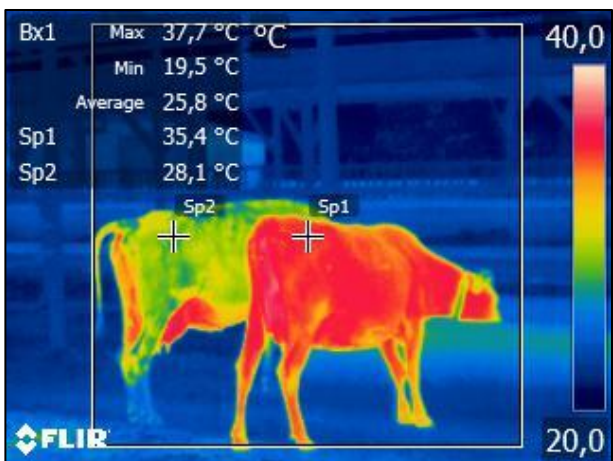


Figura 20. Efecto del SEE sobre la temperatura corporal del ganado lechero

Esta reducción en la temperatura corporal coincide con lo encontrado en otros estudios similares, en donde se da una reducción de la temperatura corporal al exponer a los

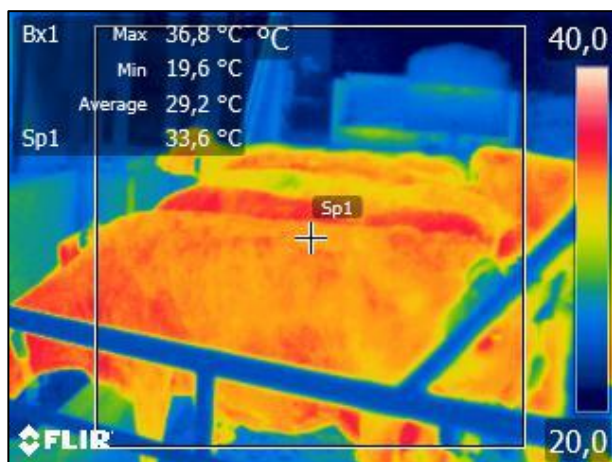
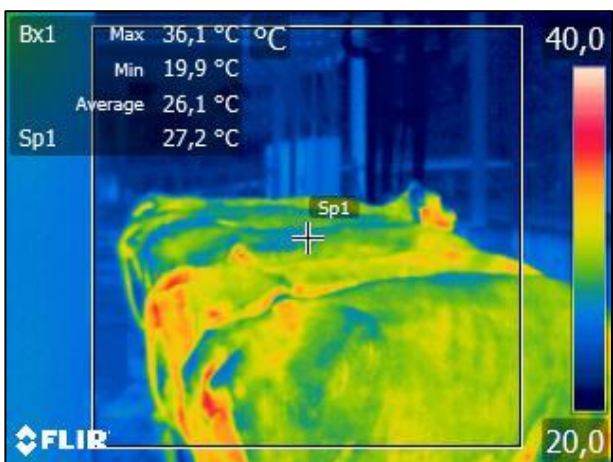
animales a algún sistema de enfriamiento que utilice agua y corrientes de aire. Sin embargo, la magnitud de esta disminución suele ser menor que la obtenida en el presente estudio. Mientras Collier *et al.* [48] hablaban de reducciones de 1,95 °C en general en la temperatura corporal, Amamou *et al.* [72] hace referencia a una reducción de 0,5 °C por cada punto de ITH reducido. En este caso, recordando del apartado anterior que la reducción en ITH obtenida fue de 2,91 puntos, según lo encontrado por Amamou *et al.* la reducción de temperatura corporal habría sido de 1,45 °C; similar a lo mencionado por Collier *et al.*; y ambos valores menores a lo obtenido en este estudio. Sin embargo, es importante tomar en cuenta factores que pudieron haber afectado en esta mayor reducción de temperatura corporal, como por ejemplo los caudales de ventilación utilizados o la baja densidad de animales en la sala de espera a causa de la división del hato en distintos bloques, la cual fue de 0,15 animales por m².

Aun así, es de destacar la diferencia en temperaturas corporales observada entre los animales expuestos al SEE y los que por el contrario no fueron expuestos. Para ejemplificar aún más esta diferencia, en la Figura 21 se muestran una serie de imágenes térmicas que permitieron realizar una comparación visual entre los animales de ambos bloques. Las imágenes térmicas fueron tomadas incluso una hora después de la exposición de los animales del Bloque A al SEE, por lo que se nota que el efecto del enfriamiento en el cuerpo del ganado perdura durante algún tiempo, lo cual podría ser indicativo de los efectos sostenidos del enfriamiento en los animales.



Izq: vaca del bloque expuesto al SEE; Der: vaca del
bloque control

Izq: vaca del bloque expuesto al SEE; Der: vaca del
bloque control



Grupo en alimentación del bloque expuesto al SEE

Grupo en alimentación del bloque control

Figura 21. Comparación mediante imágenes térmicas del ganado lechero evaluado

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

2.1- Efecto del SEE sobre la producción de leche

La producción de leche en el hato de vacas se registró por un espacio de tiempo de 3 meses, tanto para el bloque experimental sometido al SEE, como para el bloque control o que no fue expuesto al SEE en cada etapa del experimento.

Analizando los datos presentados en el Cuadro 6, se pudo observar que no hubo diferencias significativas en la leche total producida por ambos bloques durante las 3 etapas experimentales en que se dividió la toma de datos, por lo que someter a cada bloque de vacas al SEE no tuvo un efecto sobre la cantidad de leche producida.

Cuadro 6. Leche total producida por bloque experimental

Bloque	Tratamiento	Leche total (kg)	
Bloque B	Control	16,61	0,79a
Bloque A	SEE	15,66	0,77a
Bloque A	SEE	14,76	0,84a
Bloque B	SEE	15,03	0,87a
Bloque A	Control	17,36	0,87a
Bloque B	SEE	17,47	0,87a

* Comparaciones realizadas por cada fase del experimento (Figura 4)

Existen diversas causas posibles para que este efecto sobre la producción de leche no fuese observable. Entre las posibles causas se encuentra el bajo grado de estrés por calor al que realmente estaban sometidas las vacas en la EEAVM. Como se mencionó en la primera parte de los resultados de este trabajo, en promedio el ITH ambiental en la estación rondaba los 73 puntos durante la época en que se llevó a cabo el experimento, tan solo un punto por encima del considerado límite [12], [33], [34], [35]. Este hecho podría indicar que, para tal condición ambiental, las vacas de la estación todavía no presentaban condiciones de calor que mermaran su producción de leche. Asimismo, es importante tomar en cuenta que el límite de ITH utilizado en este trabajo se tomó como 72, basándose en la literatura consultada referente al tema. Sin embargo, la mayoría de los estudios desarrollados para establecer este límite se basan en experimentos en donde evalúan hatos con vacas de razas distintas, como se mostró en el Cuadro 3 presentado anteriormente. En este sentido, las vacas de raza Jersey que residen en la EEAVM suelen presentar una mejor adaptación a las condiciones del trópico [73], por lo que el límite de ITH en donde se comienzan a ver efectos sobre su producción de leche podría ser incluso superior a 72, ya que este límite se reserva para las vacas de alta producción de leche, tanto por un tema genético como por un tema nutricional [49]. Por ejemplo, Her *et al.* [74] encontraron en su estudio que la producción de leche en vacas que habían sido sometidas a un tratamiento de enfriamiento se incrementaba en 2,6 kg/d (+8 %) por encima de las vacas que no eran enfriadas. Sin embargo, las condiciones ambientales y el tratamiento de enfriamiento eran distintos del utilizado en el presente estudio, ya que el promedio de temperaturas se encontraba por encima de 26 °C entre las 7:00 a. m. y las 7:00 p. m., con máximos de hasta 32 °C; mientras que el tratamiento

de enfriamiento consistía en 9 períodos con ventilación y aspersion de agua intermitentes en lapsos de 30 minutos entre las 5:00 a. m. y las 9:00 p. m. Por otro lado, utilizando un sistema de túnel de enfriamiento evaporativo en un hato de vacas Holstein, Smith *et al.* [75] obtuvieron una mejora en la producción de leche de entre 2,6 y 2,8 kg/d, las cuales también aumentaron su consumo de alimento en un 11 % con respecto a las vacas que no fueron ingresadas al túnel de enfriamiento. Las condiciones ambientales durante el experimento presentaron un ITH mínimo de 67,5 y un ITH máximo de 76,5 dentro del túnel, mientras que en las afueras estos mismos valores fueron de entre 66,6 y 79,6, respectivamente. De manera similar, Broucek *et al.* [35] utilizaron un sistema de enfriamiento compuesto igualmente por ventiladores y aspersores de agua, los cuales se encendían automáticamente de acuerdo con las condiciones de temperatura presentes, obteniendo una mayor producción de leche mensual en un grupo de 8 vacas Holstein sometidas al enfriamiento mencionado, con otro grupo equiparado pero que fue sometido solamente a ventilación forzada (823,5 kg contra 733,2 kg, respectivamente). En este caso, el ITH promedio a lo largo del experimento realizado fue superior a 72, con períodos en que el promedio se elevaba incluso a 78.

También, otro factor a tomar en cuenta es el tiempo de familiarización que tuvieron los animales con el SEE, el cual pudo no llegar a ser suficiente ya que cada mes se exponían a un tratamiento distinto y con ello a la presencia de elementos extraños como lo eran los ventiladores y aspersores. Este hecho, combinado con los rasgos de comportamiento de cada animal y su adaptabilidad a elementos para ellos nuevos en la sala de espera, pudo llegar a tener un efecto sobre la producción. Así lo explica en su estudio Mackay *et al.* [76], el cual encontró una relación entre la disposición de las vacas a interactuar con

objetos nuevos y su producción de leche; o también Hedlund y Løvlie [77], quienes afirman existe una relación entre las respuestas de comportamiento en los animales y la producción de leche que estos presentan.

En el caso del porcentaje de grasa contenido en la leche, esta presentó diferencias significativas entre los bloques evaluados (Cuadro 7); sin embargo, dichas diferencias se mantuvieron a lo largo de todo el experimento sin importar el tratamiento al que fueron expuestos los animales, por lo que no se le puede atribuir este comportamiento de los datos a un efecto directo del enfriamiento evaporativo al que se sometieron las vacas. Ahora bien, al calcular los kilogramos de grasa en la leche, se observan diferencias significativas hasta en la tercera etapa experimental, lo que podría dar a entender que un tiempo de familiarización con el sistema es necesario para comenzar a ver los efectos positivos del mismo; no obstante, no se cuenta con suficientes datos para respaldar dicha teoría. Por otro lado, la leche corregida por grasa (LCG) no presentó diferencias significativas en ningún punto del experimento, lo que fortalece la idea de que el SEE no tuvo un efecto tangible sobre la cantidad de leche corregida por grasa.

Cuadro 7. Efecto del SEE sobre la grasa en la leche*

Bloque	Tratamiento	Grasa, %		Grasa, kg		LCG, kg	
Bloque B	Control	3,93	0,01a	0,65	0,03	16,41	0,77
Bloque A	SEE	3,77	0,01b	0,59	0,03	15,11	0,75
Bloque A	SEE	3,57	0,02b	0,53	0,03	13,83	0,80
Bloque B	SEE	3,82	0,02a	0,57	0,03	14,63	0,80
Bloque A	Control	3,49	0,02b	0,61	0,03b	16,04	0,83
Bloque B	SEE	3,92	0,02a	0,68	0,03a	17,26	0,83

* Comparaciones realizadas por cada fase del experimento (Figura 4)

En cuanto al porcentaje de proteína en la leche sucedió el mismo fenómeno que con la concentración de grasa, en que se observaron diferencias significativas hasta en la tercera etapa del experimento (Cuadro 8); sin embargo, al ir más allá y calcular la cantidad de proteína en kg, se observa que esa diferencia no llega a ser significativa y por lo tanto no se puede asegurar que el SEE tenga un efecto positivo o negativo sobre la producción de leche del hato, así como en su contenido de proteína.

Cuadro 8. Efecto del SEE sobre la proteína de la leche

Bloque	Tratamiento	PC, %		PC, kg	
Bloque B	Control	3,35	0,001a	0,56	0,03a
Bloque A	SEE	3,35	0,001a	0,52	0,03a
Bloque A	SEE	3,31	0,001a	0,49	0,03a
Bloque B	SEE	3,31	0,001a	0,50	0,03a
Bloque A	Control	3,16	0.001b	0,55	0,03a
Bloque B	SEE	3,30	0.001a	0,58	0,03a

* Comparaciones realizadas por cada fase del experimento (Figura 4)

Con la implementación de sistemas de enfriamiento similares para ganado en condiciones de estrés por calor suele notarse una mejoría en la producción de leche, así como en los contenidos de grasa y proteína. Por ejemplo, en un estudio realizado por Kaufman *et al.* [78] se notó una mejoría de la productividad en las vacas que se exponían a condiciones de enfriamiento, así como una mejor respuesta a un estímulo nutritivo basado en proteína cruda, llegando a obtenerse un incremento de hasta 23 % en la grasa de la leche al compararse una dieta con un contenido moderado de proteína cruda frente a una dieta con un contenido bajo. Por su parte Ouellet *et al.* [79] reportó que, analizando una colección de datos de 6 años en Canadá, existía evidencia de una disminución de hasta un 6 % en la grasa contenida en la leche de vacas sometidas a condiciones de calor, así como también en proteína. Por el contrario, y similar a lo hallado en este trabajo, Martínez *et al.* [80] no encontró diferencias en la producción de leche a lo largo de su estudio, citando posibles razones para que eso no se diera, como por ejemplo la elevada variación de ITH durante la época del experimento y los mecanismos de los animales

para adaptarse a las condiciones climáticas. Además, se mencionó la nula diferencia en la cantidad de materia seca ingerida entre las vacas de los grupos evaluados, una variable que sin duda debe de tomarse en cuenta en este tipo de estudios ya que determinan en gran medida la producción de leche que tendrá el hato.

2.2- Efecto del SEE sobre el conteo de células somáticas

Los datos recopilados indicaron que no hubo diferencias significativas ($p = 0,122$) entre el grupo de vacas expuesto al SEE y aquel que no, según se detalla en el Cuadro 9. Este hecho indica que el SEE instalado en la EEAVM no tuvo un efecto negativo sobre el hato, ya que el grupo expuesto no presentó un incremento del CCS en relación con el grupo control. El incremento en el CCS suele relacionarse con el estado de salud en las ubres de las vacas, y la aparición de afecciones en el hato como la mastitis bovina [65], por lo que no observar este incremento es un aspecto positivo en la implementación del SEE.

Cuadro 9. Efecto del SEE sobre el CCS

Bloque	CCS (\log_{10})
Control	5,13 ($\pm 0,16a$)
Frío	5,50 ($\pm 0,16a$)

Un aspecto que pudo influir en este resultado es que el SEE implementado hacía uso de un sistema de aspersión con tamaño de gotas relativamente grandes, por lo que el agua caía sobre el pelaje de los animales y penetraba hasta la piel, mientras que el agua que entraba en contacto con las ubres caía posteriormente al suelo por efecto de la gravedad.

Esta consideración se tomó precisamente para evitar que gotas de agua muy pequeñas generaran una “niebla” que eventualmente mojara las ubres de las vacas por la deriva con las corrientes de aire, y esto provocara una humedad perjudicial en ellas. De igual manera, en la zona en donde se ubicó el SEE se tuvo la consideración de contar con drenajes que tuviesen la capacidad de evacuar rápidamente el agua que cayera en exceso, por lo que se reduce la probabilidad de un incremento de patógenos nocivos para la salud de los animales [81].

2.3- Efecto del SEE sobre el rendimiento reproductivo

Al analizar los efectos en cuanto a rendimiento reproductivo del SEE, no se observaron diferencias significativas tanto para el número de días abiertos, como para el número de servicios por concepción. En cuanto al día de números abiertos, aquellas vacas expuestas al SEE presentaron un promedio de $101 \pm 2,28$ luego de estar expuestas por un período de 2 meses al sistema de enfriamiento, mientras que en un principio el promedio de días abiertos era de $100 \pm 2,55$. En este caso no hubo diferencias significativas ($p = 0,932$). Por otro lado, los animales que no estuvieron expuestos presentaron un promedio de días abiertos de $101 \pm 2,61$ al inicio de la evaluación y de $99 \pm 1,73$ al final de esta. En ambos bloques experimentales no hubo diferencias significativas entre los valores que presentaron de esta variable al inicio y al final del tratamiento.

Mismo caso sucedió con el número de servicios necesarios para lograr la preñez, ya que no existieron diferencias significativas en los bloques experimentales. En este caso, el

grupo expuesto al SEE presentó un promedio de números de servicio de $2,07 \pm 0,20$ al inicio del experimento, mientras que al final del experimento el número de servicios fue de $2,14 \pm 0,18$ ($p = 0,83$). Por otro lado, el bloque que no estuvo expuesto al SEE presentó un número de servicios de $2,15 \pm 0,25$ al inicio, y de $2,00 \pm 0,25$ al final ($p = 0,71$).

En este sentido, Her *et al.* [74] mencionan que para comenzar a observar una mejora en los parámetros de reproductividad de los animales, es necesario someterlas a un periodo de enfriamiento bastante mayor a 10 días, por lo que es posible que esto, aunado al bajo nivel de estrés por calor a las que están expuestas las vacas en la EEAVM, haya sido razón para no observar una diferencia en las variables analizadas. Aun así, se estima que, para poder hacer una eficaz evaluación de las mejoras reproductivas en los animales es necesario contar con más información. Por ejemplo, según Jordan [47], se debe de contar mínimo con datos mensuales que permitan hacer comparaciones y obtener conclusiones que realmente reflejen la magnitud del efecto del estrés por calor en las fincas lecheras. De igual forma, el autor menciona que, para poder entender realmente el impacto del estrés por calor, se debe de tomar en cuenta la duración y la intensidad del período de estrés.

3- Análisis financiero de la implementación del SEE en una finca lechera

Para los dos casos analizados (tanto el práctico como el teórico), la estructura de costos no cambia, por lo que en el Cuadro 10 se presenta un resumen de éstos. De igual

manera, el Anexo 2 muestra con detalle los gastos en que se incurrieron para poner en operación el SEE.

La operación del sistema se consideró para 4 meses del año, el cual es el período promedio de época seca en el país [82], tomando en cuenta específicamente el clima de la Región Central y Zona Norte, las regiones donde se concentra la producción de leche en Costa Rica [83]. Este es el momento en el año en donde es más probable experimentar las condiciones de estrés por calor para las vacas. En cuanto al mantenimiento, se consideró un mantenimiento anual en donde se podrían llevar a cabo tareas como cambio de aspersores, limpieza de filtros, revisión de motores de los ventiladores y cambios necesarios en las tuberías de polietileno.

Cuadro 10. Resumen de costos asociados al SEE

Costo total de inversión	₡ 1 693 639
Costo total de operación (anual)	₡ 261 368
Costo total de mantenimiento (anual)	₡ 100 959

Los análisis financieros de la implementación del SEE mostrados a continuación contemplaron un período de 5 años desde la puesta en funcionamiento del sistema.

3.1- Evaluación financiera basado en el caso práctico de la EEAVM

La instalación del SEE en la EEAVM no generó cambios observables en la producción de leche de las vacas, así como tampoco cambios en sus rendimientos reproductivos. Estas dos variables son las variables principales que podrían generar un ingreso económico suficiente que compense la instalación de un sistema de este tipo en una

finca lechera [68], [71]. Dicho esto, al hacer el análisis financiero de este caso, es imposible determinar ingresos directamente relacionados a la instalación del SEE, por lo que este análisis se reduce a una estimación de los costos que implica llevar a cabo el proyecto. En el Cuadro 11 se muestran entonces los principales indicadores financieros para este caso, en el cual se evaluaron dos tasas de descuento distintas (t_1 y t_2).

Cuadro 11. Indicadores financieros caso práctico EEAVM

VAN ($t_1 = 12\%$)	- ¢ 2 659 757,94
VAN ($t_2 = 8,3\%$)	- ¢ 2 726 766,37
TIR	-61 %
Relación beneficio/costo ($t_1 = 12\%$)	0,11
Relación beneficio/costo ($t_2 = 8,3\%$)	0,13

En comparación, el estudio de Igono *et al.* [84] mostró un aumento en el ingreso neto de \$0,22/vaca por día, utilizando un sistema de aspersion y ventilación para reducir el estrés por calor y que fue comparado con una estrategia de mitigación que se basaba únicamente en sombra artificial. En este estudio se tomó en cuenta el costo del alimento adicional que el hato estaría consumiendo, además del agua utilizada y la electricidad de los ventiladores; y restándole esos costos al ingreso obtenido por 2 kg extra de leche producida (en promedio). Por otro lado, St-Pierre *et al.* [68] mencionó en su estudio la importancia de contar con datos meteorológicos suficientes para optimizar el sistema de mitigación de calor que se utilizará en cada finca, ya que de esto depende la viabilidad económica de la utilización de estos sistemas en las fincas lecheras. Tomando esto en cuenta, y al hacer una estimación de las pérdidas económicas debido al estrés por calor

en Estados Unidos, se dice que es posible recortar dichas pérdidas hasta en un 41 % cuando se usa una estrategia optimizada de manejo del calor en comparación a cuando no se usa ninguna estrategia.

Como es de esperarse de acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, no existe un período de retorno de la inversión bajo estos parámetros, ya que no se generan ingresos adicionales. Sin embargo, es importante recalcar que, a pesar de lo anterior, con la instalación del SEE en la EEAVM se le está dando al módulo de la lechería una adaptación física ante posibles inclementes climáticos que se puedan generar en el futuro, especialmente importantes de considerar ante un escenario de cambio climático como el que se presenta actualmente en Costa Rica y el mundo. Es una posibilidad latente que en el futuro las épocas secas sean más severas y las condiciones de calor para los animales más impredecibles [85], por lo que contar con estrategias de abatimiento de este puede llegar a adquirir cada vez mayor importancia en las explotaciones lecheras.

Otro aspecto importante que rescatar en la instalación de este tipo de sistemas en las lecherías es el mejoramiento de las condiciones físicas para los animales. A pesar de que financieramente el proyecto no se justifica bajo los parámetros evaluados, la condición de bienestar de los animales se puede estar incrementando al otorgarles un ambiente más fresco. En este sentido, se reduce la posibilidad de que las vacas presenten estrés por calor. Es de destacar que este tipo de prácticas tienen cada vez mayor importancia en un contexto en donde la sociedad se preocupa cada vez más por las condiciones que se promueven en las industrias que trabajan con seres sintientes [7].

3.2- Evaluación financiera basada en un caso teórico

Para determinar las condiciones teóricas en que un sistema como el instalado en la EEAVM pueda ser financieramente sostenible se evaluaron tres casos distintos en donde la diferencia entre el ITH máximo (ITH_{max}) y el ITH límite (ITH_{lim}) fuera de 2 a 6. Como referencia, en el Cuadro 12 se muestra el resultado de los principales indicadores financieros utilizando los datos de ITH obtenidos en la EEAVM, los cuales son bastante similares a los presentados anteriormente para el caso práctico, esto debido principalmente a la poca diferencia entre el ITH_{max} y el ITH_{lim} , el cual es el componente con mayor peso en la fórmula utilizada para evaluar los casos. Por otro lado, en el Cuadro 13 se muestran los indicadores financieros para los casos evaluados. Acá se denota que hasta en el caso en que la diferencia entre ITH_{max} e ITH_{lim} asciende a 6 el proyecto alcanza números positivos para un período de 5 años.

Cuadro 12. Indicadores financieros caso teórico EEAVM

VAN ($t_1 = 12\%$)	- ¢ 2 576 714,55
VAN ($t_2 = 8,3\%$)	- ¢ 2 635 508,85
TIR	-58 %
Relación beneficio/costo ($t_1 = 12\%$)	0,14
Relación beneficio/costo ($t_2 = 8,3\%$)	0,16

Cuadro 13. Indicadores financieros casos teóricos propuestos

	$ITH_{max}-ITH_{lim} = 2$	$ITH_{max}-ITH_{lim} = 4$	$ITH_{max}-ITH_{lim} = 6$
VAN ($t_1 = 12\%$)	- ¢ 2 327 584,38	- ¢ 1 331 063,69	¢ 274 079,73
VAN ($t_2 = 8,3\%$)	- ¢ 2 361 736,26	- ¢ 1 266 645,91	¢ 497 268,36
TIR	-48 %	-18 %	18 %
Relación beneficio/costo ($t_1 = 12\%$)	0,22	0,49	1,09
Relación beneficio/costo ($t_2 = 8,3\%$)	0,25	0,52	1,16

Como se puede observar en el cuadro anterior, el caso evaluado en que la diferencia entre ITH_{max} e ITH_{lim} es 6 es el único que muestra un escenario positivo del proyecto. En dicho caso se obtiene un valor de VAN positivo para ambas tasas de descuento utilizadas, asimismo como un TIR superior y una relación beneficio/costo mayor a 1. Para este escenario el período de recuperación de la inversión es de 4,5 años si se evalúa con la tasa de descuento t_1 , y de 4,3 años si se evalúa con t_2 .

Este requerimiento teórico para que el proyecto sea financieramente viable involucra tener en las fincas lecheras períodos de calor de 4,5 horas diarios durante 4 meses del año, alcanzando valores de ITH superiores a 78. Si se utiliza la Ecuación 1 para obtener las temperaturas y humedades relativas asociadas a ese ITH, se podrían tener distintas posibilidades. En el Figura 22 se presentan en rojo algunas combinaciones de temperatura ambiental (T) y humedad relativa (HR) que significaría alcanzar ese valor de ITH.

Temperatura ambiental (°C)	Humedad relativa (%)											
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
26	70,7	71,3	71,8	72,4	73,0	73,6	74,2	74,7	75,3	75,9	76,5	77,1
27	71,8	72,4	73,0	73,7	74,3	74,9	75,6	76,2	76,8	77,5	78,1	78,7
28	72,9	73,6	74,2	74,9	75,6	76,3	77,0	77,6	78,3	79,0	79,7	80,4
29	74,0	74,7	75,4	76,2	76,9	77,6	78,4	79,1	79,8	80,6	81,3	82,0
30	75,1	75,9	76,6	77,4	78,2	79,0	79,8	80,5	81,3	82,1	82,9	83,7
31	76,2	77,0	77,8	78,7	79,5	80,3	81,2	82,0	82,8	83,7	84,5	85,3
32	77,3	78,2	79,0	79,9	80,8	81,7	82,6	83,4	84,3	85,2	86,1	87,0
33	78,4	79,3	80,2	81,2	82,1	83,0	84,0	84,9	85,8	86,8	87,7	88,6
34	79,5	80,5	81,4	82,4	83,4	84,4	85,4	86,3	87,3	88,3	89,3	90,3
35	80,6	81,6	82,6	83,7	84,7	85,7	86,8	87,8	88,8	89,9	90,9	91,9

Figura 22. Combinaciones de T y HR para un ITH superior a 78

Tomando en cuenta la figura anterior, se puede percibir que temperaturas tan bajas como de 27 °C pueden llegar a significar un ITH superior a 78, siempre y cuando la humedad relativa del lugar sea de al menos 80 %. Por otro lado, temperaturas ambientales superiores a los 32 °C también pueden superar este parámetro de 78, aún incluso con humedades relativas relativamente bajas. Según datos del Instituto Meteorológico Nacional, estas condiciones de temperatura son frecuentemente alcanzadas en el país en regiones como la central (especialmente en el valle oriental) y la Zona Norte, específicamente en las épocas secas de cada región [86], [87].

En el Anexo 3 de este trabajo se muestra el detalle de cada uno de los análisis financieros llevados a cabo.

Conclusiones

Para el alivio del estrés por calor en las vacas lecheras, se diseñó y evaluó un sistema de enfriamiento evaporativo (SEE) colocado en la sala de espera previa a la sala de ordeño de la Estación Experimental Alfredo Volio Mata de la Universidad de Costa Rica. El sistema está compuesto por dos ventiladores con 3 aspas de propela, con un tamaño de 52 pulgadas de diámetro cada uno. Los ventiladores tienen una capacidad de empuje de aire de 26 700 cfm, con velocidades de 5,2 m/s a una distancia de 6,6 m. Asimismo, se complementa el sistema con un sistema de aspersión de agua colocado a nivel aéreo en la sala, con 4 aspersores con un caudal de descarga de 1,67 L/min y un radio de mojado de 3,75 m. El sistema fue probado y la velocidad del viento obtenida fue de entre 2 y 3 m/s a lo largo de toda la sala de espera; mientras que el coeficiente de uniformidad para la aspersión fue de 61 %. Ambos parámetros se consideraron aceptables para el fin práctico del sistema de enfriamiento.

El funcionamiento del sistema de enfriamiento evaporativo generó una disminución de 2,91 puntos de ITH en la sala de espera. De igual manera, el SEE también presentó un efecto sobre la temperatura corporal de los animales expuestos a este. En general, la disminución de la temperatura corporal de los animales expuestos al SEE fue de 3,97 °C.

Por otro lado, al monitorear el efecto del SEE sobre la producción y la calidad de leche, así como sobre el rendimiento reproductivo de los animales, se observó que este no tuvo un efecto significativo. La producción de leche entre los bloques experimentales que fueron y no fueron expuestos al SEE no presentaron diferencias significativas, como tampoco presentaron diferencias significativas el contenido de grasa o la proteína en la

leche. En cuanto al contenido de células somáticas, este tampoco presentó variación entre los bloques, aspecto rescatable ya que se desecha la posibilidad de que el ambiente húmedo proporcionado por el sistema en la sala de espera influyera en este indicador de salud de las vacas.

Bajo el panorama presentado de ausencia de incremento en la producción de leche o mejora en el rendimiento reproductivo, la instalación del SEE no es factible económicamente. La inversión necesaria para la instalación de este tipo de sistemas en un lugar con condiciones climáticas similares a las actuales en la Estación Alfredo Volio Mata asciende a ₡ 1.693.639, con costos de operación y mantenimiento anuales de ₡ 261.368 y ₡ 100.959, respectivamente. Los indicadores financieros bajo este panorama son negativos para las dos tasas de descuento utilizadas ($t_1 = 12\%$ y $t_2 = 8,3\%$), con un VAN (t_1) = - ₡ 2 659 757,94 y un VAN (t_2) = -₡ 2 726 766,37; así como una relación beneficio/costo (t_1) = 0,11 y una relación beneficio/costo (t_2) = 0,13; con una TIR = -61 %.

Sin embargo, se determinó que el proyecto podría ser económicamente factible en un sitio donde las condiciones del lugar involucren temperaturas ambientales más elevadas. Haciendo uso de una ecuación para el cálculo de leche producida en condiciones de estrés por calor, se estima que para lugares en que el ITH se encuentre 6 puntos por encima del límite el proyecto podría justificarse financieramente. En este escenario, el VAN (t_1) = ₡ 274 079,73 y un VAN (t_2) = ₡ 497 268,36; así como una relación beneficio/costo (t_1) = 1,09 y una relación beneficio/costo (t_2) = 1,16, con una TIR = 18 %.

En todo caso, la instalación del SEE en la Estación Experimental ofrece un acercamiento del uso de tecnologías para el control del estrés por calor en las fincas lecheras costarricenses, con el beneficio adicional de proveer a las explotaciones lecheras de una estrategia de adaptación al cambio climático y mitigación de los efectos adversos que puedan llegar a provocar los eventos extremos a causa de este.

Recomendaciones

El sistema ofrece gran capacidad de adaptación a nivel de automatización, ya que se pueden incluir controladores de bajo costo que respondan automáticamente a las condiciones de temperatura y humedad del exterior; y esto provoque el encendido o apagado del sistema, generando un ahorro de recursos. De igual manera, el sistema informático SCR Data Flow II de la Estación Experimental Alfredo Volio Mata, cuenta con un módulo de seguimiento de estrés por calor en las vacas basado en el nivel de respiración que presenta cada animal y para el cual se podría estudiar la posibilidad de interconexión con el sistema de enfriamiento en la sala de espera.

Para hacer uso en otros lugares del país de tecnologías de control de estrés por calor en ganado lechero será necesario primero hacer una evaluación ambiental del sitio, con el fin de determinar anticipadamente el sistema que mejores resultados podría generar. Esto es, hacer un análisis de las condiciones ambientales en cuanto a temperaturas ambiental y humedades relativas, adaptando el sistema de acuerdo con esto y evaluando la necesidad del uso de aspersores, ventiladores u otros mecanismos de enfriamiento; como por ejemplo los comentados en el marco teórico de este trabajo. En este caso, también es importante tomar en cuenta el aspecto económico que conlleva la instalación de estos distintos sistemas, los cuales variarán del evaluado en este trabajo.

Es necesario también evaluar el nivel de estrés por calor que pueden llegar a experimentar las vacas lecheras (específicamente las de la raza Jersey) mediante algún método más enfocado en el animal, como por ejemplo las respiraciones por minuto. Asimismo, a la temperatura corporal de los animales se les puede dar un seguimiento

continuo mediante el uso de data loggers intravaginales que monitoreen la temperatura interna de los animales para una medición mucho más precisa.

En cuanto a métricas de producción, es necesario realizar estudios en donde se monitoree la ingesta de materia seca de los animales, ya que esta podría explicar la ausencia de efectos en la producción de leche o en sus parámetros de calidad.

A nivel financiero, se pueden considerar otras metodologías de cálculos de evaluación financiera distintas a las utilizadas en este proyecto, enfocadas específicamente en proyectos de mejora de alguna actividad económica; ya que estas pueden variar en plazos, intereses, etc.

Este tipo de estudios se beneficiaría en gran medida de réplicas de este en zonas del país en donde las condiciones climáticas de estrés por calor sean más severas, y donde posiblemente la presencia de efectos adversos en los animales ya se esté dando. Igualmente, es necesario acompañar los estudios de proyecciones financieras debido a que la sostenibilidad de estos sistemas en las fincas lecheras costarricenses depende en gran medida del impacto económico que puedan generar.

Referencias bibliográficas

- [1] C. M. Saviani, «Sustentabilidad Ambiental y Eficiencia Productiva. Un abordaje único», en *Congreso Nacional Lechero*, 2020, pp. 18-30.
- [2] D. Cantillo Simón, «Situación Actual y perspectivas del sector lácteo costarricense», en *Congreso Nacional Lechero*, 2020, pp. 15-24.
- [3] James A. DeShazer, G. LeRoy Hahn, Hongwei Xin, James A. DeShazer, G. LeRoy Hahn, y Hongwei Xin, «Chapter 1: Basic Principles of the Thermal Environment and Livestock Energetics», en *Livestock Energetics and Thermal Environment Management*, 2013.
- [4] D. J. Mellor y A. C. D. Bayvel, «The application of legislation, scientific guidelines and codified standards to advancing animal welfare», en *Global Conference on Animal Welfare: an OIE initiative*, 2004, pp. 249-256.
- [5] A. J. F. Webster, «Farm Animal Welfare: The Five Freedoms and the Free Market», *Vet. J.*, vol. 161, n.º 3, pp. 229-237, 2001.
- [6] J. Rushen, A. M. de Passillé, M. A. G. von Keyserlingk, y D. M. Weary, *The Welfare of Cattle*, n.º Volumen 5. Springer, 2008.
- [7] D. J. Mellor y K. J. Stafford, «Integrating practical, regulatory and ethical strategies for enhancing farm animal welfare», *Aust. Vet. J.*, vol. 79, n.º 11, pp. 762-768, 2001.
- [8] I. Flamenbaum, D. Wolfenson, M. Mamen, y A. Berman, «Cooling Dairy Cattle by a Combination of Sprinkling and Forced Ventilation and Its Implementation in the Shelter System», *J. Dairy Sci.*, vol. 69, n.º 12, pp. 3140-3147, 1986.
- [9] R. E. McDowell, N. W. Hooven, y J. K. Camoens, «Effect of Climate on Performance of Holsteins in First Lactation», *J. Dairy Sci.*, vol. 59, n.º 5, pp. 965-971, 1976.

- [10] A. D. Ealy, M. Drost, y P. J. Hansen, «Developmental Changes in Embryonic Resistance to Adverse Effects of Maternal Heat Stress in Cows», *J. Dairy Sci.*, vol. 76, n.º 10, pp. 2899-2905, 1993.
- [11] S. J. Wilson, C. J. Kirby, A. T. Koenigsfeld, D. H. Keisler, y M. C. Lucy, «Effects of Controlled Heat Stress on Ovarian Function of Dairy Cattle. 2. Heifers», *J. Dairy Sci.*, vol. 81, n.º 8, pp. 2132-2138, 1998.
- [12] J. Bohmanova, I. Misztal, y J. B. Cole, «Temperature-humidity indices as indicators of milk production losses due to heat stress», *J. Dairy Sci.*, vol. 90, n.º 4, pp. 1947-1956, 2007.
- [13] E. C. Thom, «Cooling degree days. Air conditioning, Heating and Ventilating», vol. 55, n.º 7, pp. 65-72, 1958.
- [14] I. L. Berry, M. Shanklin, y H. D. Johnson, «Dairy Shelter Design Based on Milk Production Decline as Affected by Temperature and Humidity», *Trans. ASAE*, vol. 7, n.º 3, pp. 329-331, 1964.
- [15] T. L. Mader, M. S. Davis, y T. Brown-Brandl, «Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle», *J. Anim. Sci.*, vol. 84, n.º 3, pp. 712-719, 2006.
- [16] J. M. Morton, W. P. Tranter, D. G. Mayers, y N. N. Jonsson, «Effects of environmental heat on conception rates in lactating dairy cows: Critical periods of exposure», *J. Dairy Sci.*, vol. 90, n.º 5, pp. 2271-2278, 2007.
- [17] J. W. West, «Effects of Heat-Stress on Production in Dairy Cattle», *J. Dairy Sci.*, vol. 86, n.º 6, pp. 2131-2144, 2010.
- [18] R. Collier, L. Baumgard, A. L. Lock, y D. E. Bauman, «Physiological Limitations: nutrient partitioning», en *Yields of farmed species: constraints and opportunities in the 21st*

Century. Proc. 61st Easter School, 2005, pp. 351-377.

- [19] V. A. Finch, «Body Temperature in Beef Cattle: Its Control and Relevance to Production in the Tropics», *J. Anim. Sci.*, vol. 62, n.º 2, pp. 531-542, 1986.
- [20] D. E. Bauman y W. Bruce Currie, «Partitioning of Nutrients During Pregnancy and Lactation: A Review of Mechanisms Involving Homeostasis and Homeorhesis», *J. Dairy Sci.*, vol. 63, n.º 9, pp. 1514-1529, 1980.
- [21] M. L. Rhoads *et al.*, «Effects of heat stress and plane of nutrition on lactating Holstein cows: I. Production, metabolism, and aspects of circulating somatotropin», *J. Dairy Sci.*, vol. 92, n.º 5, pp. 1986-1997, 2009.
- [22] O. Lamp, M. Derno, W. Otten, M. Mielenz, G. Nürnberg, y B. Kuhla, «Metabolic heat stress adaption in transition cows: Differences in macronutrient oxidation between late-gestating and early-lactating German Holstein dairy cows», *PLoS One*, vol. 10, n.º 5, pp. 1-24, 2015.
- [23] J. F. Smith, R. J. Collier, J. P. Harner, y B. J. Bradford, «Strategies to reduce heat stress in dairy cattle», en *Southwest Nutrition and Management Conference*, 2012, pp. 65-84.
- [24] K. E. Schütz, N. R. Cox, y L. R. Matthews, «How important is shade to dairy cattle? Choice between shade or lying following different levels of lying deprivation», *Appl. Anim. Behav. Sci.*, vol. 114, n.º 3-4, pp. 307-318, 2008.
- [25] G. Tresoldi, K. E. Schütz, y C. B. Tucker, «Assessing heat load in drylot dairy cattle: Refining on-farm sampling methodology», *J. Dairy Sci.*, vol. 99, n.º 11, pp. 8970-8980, 2016.
- [26] X. Wang, B. S. Bjerg, C. Y. Choi, C. Zong, y G. Zhang, «A review and quantitative assessment of cattle-related thermal indices», *Journal of Thermal Biology*, vol. 77. 2018.

- [27] W. Bianca, «Relative Importance of Dry and Wet-Bulb Temperatures in Causing Heat Stress in Cattle», *Nature*, vol. 195, p. 251, 1962.
- [28] National Research Council, *A Guide to Environmental Research on Animals*. Washington: National Academy of Sciences, 1971.
- [29] M. Yousef, *Stress physiology in livestock*, vol. 1. Florida: CRC Press, 1986.
- [30] R. B. Zimbelman, L. H. Baumgard, y R. J. Collier, «Effects of encapsulated niacin on evaporative heat loss and body temperature in moderately heat-stressed lactating Holstein cows», *J. Dairy Sci.*, vol. 93, n.º 6, pp. 2387-2394, 2010.
- [31] A. Berman, «Estimates of heat stress relief needs for Holstein dairy cows», *J. Anim. Sci.*, vol. 83, n.º 6, pp. 1377-1384, 2005.
- [32] M. O. Igono, G. Bjotvedt, y H. T. Sanford-Crane, «Environmental profile and critical temperature effects on milk production of Holstein cows in desert climate», *Int. J. Biometeorol.*, vol. 36, n.º 2, pp. 77-87, 1992.
- [33] O. Ravagnolo y I. Misztal, «Genetic component of heat stress in dairy cattle, parameter estimation», *J. Dairy Sci.*, vol. 83, n.º 9, pp. 2126-2130, 2000.
- [34] O. Ravagnolo y I. Misztal, «Studies on genetics of heat tolerance in dairy cattle with reduced weather information via cluster analysis», *J. Dairy Sci.*, vol. 85, n.º 6, pp. 1586-1589, 2002.
- [35] J. Broucek, S. Ryba, S. Mihina, M. Uhrincat, y P. Kisac, «Impact of thermal-humidity index on milk yield under conditions of different dairy management», *J. Anim. Feed Sci.*, vol. 16, n.º 3, pp. 329-344, 2007.
- [36] S. Dikmen y P. J. Hansen, «Is the temperature-humidity index the best indicator of heat

- stress in lactating dairy cows in a subtropical environment ?», *J. Dairy Sci.*, vol. 92, n.º 1, pp. 109-116, 2009.
- [37] R. B. Zimbelman, R. P. Rhoads, R. J. Collier, y G. C. Duff, «A re-evaluation of the impact of temperature humidity index (THI) and black globe humidity index (BGHI) on milk production in high producing dairy cows», n.º January 2017, pp. 158-169, 2009.
- [38] K. Brügemann, E. Gernand, U. König Von Borstel, y S. König, «Defining and evaluating heat stress thresholds in different dairy cow production systems», *Arch. Anim. Breed.*, vol. 55, n.º 1, pp. 13-24, 2012.
- [39] H. Hammami, J. Bormann, N. M'hamdi, H. H. Montaldo, y N. Gengler, «Evaluation of heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holsteins in a temperate environment», *J. Dairy Sci.*, vol. 96, n.º 3, pp. 1844-1855, 2013.
- [40] U. Bernabucci, S. Biffani, L. Buggiotti, A. Vitali, N. Lacetera, y A. Nardone, «The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle», *J. Dairy Sci.*, vol. 97, n.º 1, pp. 471-486, 2014.
- [41] G. A. Bavera, «Jersey», *Razas bovinas*, 2007. [En línea]. Disponible en: https://www.produccion-animal.com.ar/informacion_tecnica/razas_bovinas/73-jersey.pdf. [Accedido: 23-oct-2021].
- [42] R. J. Collier, L. W. Hall, S. Rungruang, y R. B. Zimbleman, «Quantifying heat stress and its impact on metabolism and performance», *MidSouth Rumin. Nutr. Conf.*, n.º November 2014, pp. 74-84, 2012.
- [43] D. G. Mayer *et al.*, «Extent and economic effect of heat loads on dairy cattle production in Australia THI Temperature-humidity index», *Aust. Vet. J.*, vol. 77, n.º 12, 1999.
- [44] O. Ravagnolo, I. Misztal, y G. Hoogenboom, «Genetic component of heat stress in dairy

- cattle, development of heat index function», *J. Dairy Sci.*, vol. 83, n.º 9, pp. 2120-2125, 2000.
- [45] S. Tao *et al.*, «Effect of heat stress during the dry period on mammary gland development», *J. Dairy Sci.*, vol. 94, n.º 12, pp. 5976-5986, 2011.
- [46] A. Nardone, N. Lacetera, U. Bernabucci, y B. Ronchi, «Composition of Colostrum from Dairy Heifers Exposed to High Air Temperatures during Late Pregnancy and the Early Postpartum Period», *J. Dairy Sci.*, vol. 80, n.º 5, pp. 838-844, 1997.
- [47] E. R. Jordan, «Effects of heat stress on reproduction», *J. Dairy Sci.*, vol. 86, n.º SUPPL. 1, pp. E104-E114, 2003.
- [48] R. Collier, G. E. Dahl, y M. J. VanBaale, «Major Advances Associated with Environmental Effects on Dairy Cattle», *J. Dairy Sci.*, vol. 89, n.º 4, pp. 1244-1253, 2006.
- [49] C. T. Kadzere, M. R. Murphy, N. Silanikove, y E. Maltz, «Heat stress in lactating dairy cows: A review», *Livest. Prod. Sci.*, vol. 77, n.º 1, pp. 59-91, 2002.
- [50] J. Radoń, W. Bieda, J. Lendelová, y Š. Pogran, «Computational model of heat exchange between dairy cow and bedding», *Comput. Electron. Agric.*, vol. 107, pp. 29-37, 2014.
- [51] C. B. Tucker, A. R. Rogers, y K. E. Schütz, «Effect of solar radiation on dairy cattle behaviour, use of shade and body temperature in a pasture-based system», *Appl. Anim. Behav. Sci.*, vol. 109, n.º 2-4, pp. 141-154, 2008.
- [52] A. Berman, «Extending the potential of evaporative cooling for heat-stress relief», *J. Dairy Sci.*, vol. 89, n.º 10, pp. 3817-3825, 2006.
- [53] D. V. Armstrong, «Symposium - Nutrition and Heat-Stress: Heat-Stress Interaction With Shade and Cooling», *J. Dairy Sci.*, vol. 77, n.º 7, pp. 2044-2050, 1994.

- [54] M. R. Mondaca, «Ventilation Systems for Adult Dairy Cattle», *Vet. Clin. North Am. - Food Anim. Pract.*, vol. 35, n.º 1, pp. 139-156, 2019.
- [55] J. C. Lin *et al.*, «Comparison of various fan, sprinkler, and mister systems in reducing heat stress in dairy cows», *Appl. Eng. Agric.*, vol. 14, n.º 2, pp. 177-182, 1998.
- [56] W. C. Hinds, *Aerosol Technology: Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 2.^a ed. New York: John Wiley and Sons, 1999.
- [57] G. Tresoldi, K. E. Schütz, y C. B. Tucker, «Cooling cows with sprinklers: Effects of soaker flow rate and timing on behavioral and physiological responses to heat load and production», *J. Dairy Sci.*, vol. 102, n.º 1, pp. 528-538, 2018.
- [58] M. J. Brouk, J. F. Smith, y J. P. Harner, «Effect of Sprinkling Frequency and Airflow on Respiration Rate, Body Surface Temperature and Body Temperature of Heat Stressed Dairy Cattle», en *Fifth International Dairy Housing Proceedings*, 2003, vol. 1, n.º 701, pp. 263-268.
- [59] P. E. Hillman, K. G. Gebremedhin, A. Parhurst, J. Fuquay, y S. Willard, «Evaporative and convective cooling of cows in a hot and humid environment», en *Livestock Environment VI*, 201d. C., n.º 701, pp. 343-350.
- [60] J. A. Elizondo-Salazar, «Calidad nutricional y consumo de forraje de Maíz (*Zea mays*) y forraje de Estrella Africana (*Cynodon nlemfuensis*) con o sin alimento balanceado en cabras», *Nutr. Anim. Trop.*, vol. 9, n.º 2, p. 11, 2015.
- [61] É. Zúñiga Martínez, *Diseño y evaluación del riego a presión*, 1.^a ed. San José, CR: Editorial de la Universidad de Costa Rica, 2004.
- [62] D. M. Echeverri Echeverri, L. F. Galeano-Vasco, J. P. Ramírez Arias, M. F. Cerón-Muñoz,

- y S. M. Márquez Girón, «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», *Rev. Med. Vet. (Bogota)*., n.º 36, pp. 97-107, 2018.
- [63] J. R. Gandra *et al.*, «Influence of a feed additive containing vitamin B 12 and yeast extract on milk production and body temperature of grazing dairy cows under high temperature-humidity index environment», *Livest. Sci.*, vol. 221, n.º January, pp. 28-32, 2019.
- [64] V. Poikalainen, J. Praks, I. Veermäe, y E. Kokin, «Infrared temperature patterns of cow's body as an indicator for health control at precision cattle farming», *Agron. Res.*, vol. 10, n.º SPEC. ISS. 1, pp. 187-194, 2012.
- [65] T. Bobbo, S. Biffani, C. Taccioli, M. Penasa, y M. Cassandro, «Comparison of machine learning methods to predict udder health status based on somatic cell counts in dairy cows», *Sci. Rep.*, vol. 11, n.º 1, pp. 1-10, 2021.
- [66] J. J. Peralta Abadía, «Análisis financiero para la apertura de una nueva sucursal de Autoservicio Joax S.A., en la provincia de San José», Universidad de Costa Rica, 2013.
- [67] G. Alpízar, A. Vargas, y M. Ugalde, «Determinación de la tasa de descuento para evaluar la rentabilidad de un emprendimiento local de secado de frutas y vegetales», Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2017.
- [68] N. R. St-Pierre, B. Cobanov, y G. Schmitkey, «Economic Losses from Heat Stress by US Livestock Industries», *J. Dairy Sci.*, vol. 86, n.º 31, pp. E52-E77, 2010.
- [69] I. Atkins, C. Y. Choi, y B. Holmes, «Dairy Cooling in Humid Subtropical Climates», Wisconsin.
- [70] H. House, «Keeping Cool - Set Up Supplemental Fans Now to Comfort Cows Next

- Summer», *Ontario Milk Producer*, 2002. [En línea]. Disponible en: http://www.omafra.gov.on.ca/english/livestock/dairy/facts/info_keeping.htm. [Accedido: 10-jun-2019].
- [71] I. Atkins, C. Y. Choi, y B. Holmes, «Dairy Cooling: The Benefits and Strategies», Department of Biological Systems Engineering, Wisconsin, 2016.
- [72] H. Amamou, Y. Beckers, M. Mahouachi, y H. Hammami, «Thermotolerance indicators related to production and physiological responses to heat stress of holstein cows», *J. Therm. Biol.*, vol. 82, n.º March, pp. 90-98, 2019.
- [73] D. Moreira y C. Castro, «Lechería climáticamente inteligente. Adaptación y Mitigación en el Trópico Húmedo», San José, Costa Rica, 2016.
- [74] E. Her, D. Wolfenson, I. Flamenbaum, Y. Folman, M. Kaim, y A. Berman, «Thermal, Productive, and Reproductive Responses of High Yielding Cows Exposed to Short-Term Cooling in Summer», *J. Dairy Sci.*, vol. 71, n.º 4, pp. 1085-1092, 1988.
- [75] T. R. Smith *et al.*, «Evaporative Tunnel Cooling of Dairy Cows in the Southeast. II: Impact on Lactation Performance», *J. Dairy Sci.*, vol. 89, n.º 10, pp. 3915-3923, 2010.
- [76] J. R. D. MacKay, M. J. Haskell, J. M. Deag, y K. van Reenen, «Fear responses to novelty in testing environments are related to day-to-day activity in the home environment in dairy cattle», *Appl. Anim. Behav. Sci.*, vol. 152, pp. 7-16, 2014.
- [77] L. Hedlund y H. Løvlie, «Personality and production: Nervous cows produce less milk», *J. Dairy Sci.*, vol. 98, n.º 9, pp. 5819-5828, 2015.
- [78] J. D. Kaufman, H. R. Bailey, A. M. Kennedy, F. E. Löffler, y A. G. Ríus, «Cooling and dietary crude protein affected milk production on heat-stressed dairy cows», *Livest. Sci.*, vol. 240,

n.º June, p. 104111, 2020.

- [79] V. Ouellet, V. E. Cabrera, L. Fadul-Pacheco, y Charbonneau, «The relationship between the number of consecutive days with heat stress and milk production of Holstein dairy cows raised in a humid continental climate», *J. Dairy Sci.*, vol. 102, n.º 9, pp. 8537-8545, 2019.
- [80] R. S. Martínez *et al.*, «Providing heat-stress abatement to late-lactation Holstein cows affects hormones, metabolite blood profiles, and hepatic gene expression but not productive responses», *Appl. Anim. Sci.*, vol. 37, n.º 4, pp. 490-503, 2021.
- [81] G. E. Dahl, «Impact and Mitigation of Heat Stress for Mastitis Control», *Vet. Clin. North Am. - Food Anim. Pract.*, vol. 34, n.º 3, pp. 473-478, 2018.
- [82] Instituto Meteorológico Nacional, «Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica», San José, Costa Rica, 2008.
- [83] O. Barrientos y L. Villegas, «Cadena Productiva de Leche: Políticas y Acciones», San José, Costa Rica, 2010.
- [84] M. O. Igono, H. D. Johnson, B. J. Steevens, G. F. Krause, y M. D. Shanklin, «Physiological, Productive, and Economic Benefits of Shade, Spray, and Fan System Versus Shade for Holstein Cows During Summer Heat», *J. Dairy Sci.*, vol. 70, n.º 5, pp. 1069-1079, 1987.
- [85] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), «Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change», New York, NY, 2007.
- [86] Instituto Meteorológico Nacional, «Región Central: dos valles». [En línea]. Disponible en: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/31165/Clima+Valle+Central/9b5f5941-3708-4d18-991f-ada9cf795864>. [Accedido: 06-jul-2021].

- [87] Instituto Meteorológico Nacional, «Zona Norte». [En línea]. Disponible en: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/31165/Clima+Valle+Central/9b5f5941-3708-4d18-991f-ada9cf795864>. [Accedido: 06-jul-2021].
- [88] Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP), «Resolución RE-0006-IA-2021», 2021. [En línea]. Disponible en: <https://aresep.go.cr/agua-potable/tarifas/3244-tarifa-acueducto-aya-2021>. [Accedido: 17-jun-2021].
- [89] R. y A. (Senara) Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, «Dotaciones agua para calcular las necesidades de las solicitudes de concesión de aprovechamiento de aguas», 2004. [En línea]. Disponible en: <http://www.da.go.cr/wp-content/uploads/2016/06/MANUAL-DE-DOTACIONES-AGUA.pdf>. [Accedido: 17-jun-2021].
- [90] Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), «Tarifas eléctricas», 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.cnfl.go.cr/documentos/transparencia/consolidado_tarifas.pdf. [Accedido: 10-jun-2021].
- [91] Ó. Sanabria Garro, «Manejo económico de fincas lecheras», en *Congreso Nacional Lechero*, 2020.
- [92] Ministerio de Hacienda, «Hacienda actualizó los tramos del impuesto sobre la renta que regirán a partir de enero 2021», 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.hacienda.go.cr/noticias/16175-hacienda-actualizo-los-tramos-del-impuesto-sobre-la-renta-que-regiran-a-partir-de-enero-2021>. [Accedido: 05-jul-2021].

Anexo 1: Valores de ITH medidos en el área bajo la influencia del SEE y el área fuera de la influencia del SEE (ambiente)

Fecha	Semana	ITH - SEE promedio	ITH - SEE máximo	ITH - SEE mínimo	ITH - Ambiente promedio	ITH - Ambiente máxima	ITH - Ambiente mínima
27/1/2020	1-Semana 1	70,0	71,7	67,8	71,6	73,1	69,7
28/1/2020	1-Semana 1	67,3	69,1	66,0	68,2	69,2	67,4
29/1/2020	1-Semana 1	69,4	70,3	68,4	69,8	70,6	68,8
30/1/2020	1-Semana 1	70,5	72,3	68,9	71,8	73,5	70,8
31/1/2020	1-Semana 1	70,7	72,4	68,5	71,7	72,7	71,7
1/2/2020	1-Semana 1	72,1	73,4	70,8	74,9	76,4	73,2
2/2/2020	1-Semana 1	66,6	69,2	64,2	68,0	69,3	66,6
3/2/2020	1-Semana 2	69,5	71,0	68,5	73,0	73,9	72,1
4/2/2020	1-Semana 2	70,8	72,8	69,7	74,2	74,8	73,7
5/2/2020	1-Semana 2	72,1	73,8	70,6	75,7	76,3	75,3
6/2/2020	1-Semana 2	70,2	71,1	68,9	72,8	73,9	71,4
7/2/2020	1-Semana 2	70,0	71,0	68,5	72,6	73,7	71,0
8/2/2020	1-Semana 2	71,3	76,2	68,2	75,5	78,8	72,7
9/2/2020	1-Semana 2	66,9	69,4	64,4	71,2	73,4	69,5
10/2/2020	1-Semana 3	70,2	71,9	69,2	76,1	76,6	75,3
11/2/2020	1-Semana 3	69,2	71,2	67,1	72,1	72,7	71,5
12/2/2020	1-Semana 3	70,0	73,1	65,6	73,4	74,9	71,2
13/2/2020	1-Semana 3	73,6	77,2	72,1	77,2	78,5	75,6
14/2/2020	1-Semana 3	66,0	69,4	62,9	68,7	70,3	67,0
15/2/2020	1-Semana 3	66,6	68,2	65,4	70,1	72,1	68,9
16/2/2020	1-Semana 3	69,5	70,9	67,8	72,6	73,6	72,0
17/2/2020	1-Semana 4	69,5	70,7	67,7	72,9	74,4	71,7
18/2/2020	1-Semana 4	69,9	71,1	67,3	74,0	74,8	73,0
19/2/2020	1-Semana 4	70,7	72,3	69,5	74,6	76,5	73,2
20/2/2020	1-Semana 4	69,1	70,8	66,8	70,9	72,0	69,8
21/2/2020	1-Semana 4	70,6	72,8	68,0	74,9	76,0	73,4
22/2/2020	1-Semana 4	67,1	68,9	65,2	68,9	70,3	67,9
23/2/2020	1-Semana 4	67,7	69,8	66,3	72,4	74,8	70,9
24/2/2020	1-Semana 5	71,0	73,1	69,7	75,9	77,2	75,0
25/2/2020	1-Semana 5	67,8	69,7	66,0	69,3	70,0	68,7
26/2/2020	1-Semana 5	69,6	71,1	68,1	71,1	72,1	70,4
27/2/2020	1-Semana 5	71,5	72,4	70,2	72,8	74,2	72,1
28/2/2020	1-Semana 5	68,3	70,3	66,0	74,3	74,9	73,4
29/2/2020	1-Semana 5	69,8	69,8	69,8	72,7	72,7	72,7
1/3/2020	1-Semana 5	69,8	69,8	69,8	72,7	72,7	72,7

Fecha	Semana	ITH - SEE promedio	ITH - SEE máximo	ITH - SEE mínimo	ITH - Ambiente promedio	ITH - Ambiente máxima	ITH - Ambiente mínima
2/3/2020	2-Semana 1	72,7	74,3	71,1	77,9	79,0	76,1
3/3/2020	2-Semana 1	72,4	73,6	70,3	75,1	76,3	74,0
4/3/2020	2-Semana 1	72,8	74,8	71,0	77,6	78,8	76,3
5/3/2020	2-Semana 1	75,0	76,7	73,2	78,6	80,2	76,6
6/3/2020	2-Semana 1	69,9	71,6	67,9	75,4	76,4	73,9
7/3/2020	2-Semana 1	71,2	72,4	70,6	74,2	76,3	73,1
8/3/2020	2-Semana 1	70,8	73,2	68,8	76,7	79,4	74,1
9/3/2020	2-Semana 2	71,1	72,6	68,9	76,6	79,6	73,7
10/3/2020	2-Semana 2	68,5	70,4	66,1	74,0	74,9	72,8
11/3/2020	2-Semana 2	70,3	72,0	68,3	75,5	76,8	73,4
12/3/2020	2-Semana 2	71,3	73,0	69,6	74,8	76,8	72,6
13/3/2020	2-Semana 2	70,9	73,3	67,7	75,5	76,8	74,6
14/3/2020	2-Semana 2	70,0	71,8	67,6	74,5	75,8	72,9
15/3/2020	2-Semana 2	70,0	71,8	67,6	74,5	75,8	72,9
16/3/2020	2-Semana 3	68,1	70,0	65,7	72,8	73,7	71,4
17/3/2020	2-Semana 3	69,0	70,3	66,4	72,9	73,8	71,9
18/3/2020	2-Semana 3	70,2	72,1	67,7	75,3	76,9	73,3
19/3/2020	2-Semana 3	70,8	72,2	69,8	76,8	79,1	74,9
20/3/2020	2-Semana 3	72,4	74,4	70,3	76,9	79,5	74,7
21/3/2020	2-Semana 3	71,8	73,0	70,9	76,6	78,7	74,5
22/3/2020	2-Semana 3	73,8	75,1	72,7	79,1	81,4	76,2
23/3/2020	2-Semana 4	68,6	70,6	66,4	74,3	76,1	72,4
24/3/2020	2-Semana 4	68,2	72,1	64,4	70,8	74,2	68,0
25/3/2020	2-Semana 4	72,7	76,3	70,7	74,1	79,6	68,0
26/3/2020	2-Semana 4	73,2	76,2	69,1	77,0	79,6	76,0
27/3/2020	2-Semana 4	72,4	77,1	68,4	77,8	80,3	76,4
28/3/2020	2-Semana 4	76,1	78,1	74,7	78,7	79,4	77,3
29/3/2020	2-Semana 4	74,4	76,0	73,0	77,3	78,6	75,3

Fecha	Semana	ITH - SEE promedio	ITH - SEE máximo	ITH - SEE mínimo	ITH - Ambiente promedio	ITH - Ambiente máxima	ITH - Ambiente mínima
20/4/2020	3-Semana 1	67,8	68,9	66,2	67,0	67,4	66,7
21/4/2020	3-Semana 1	68,1	70,1	65,7	69,0	70,1	67,6
22/4/2020	3-Semana 1	72,3	75,4	69,4	75,7	78,0	73,4
23/4/2020	3-Semana 1	69,8	74,0	65,7	71,7	73,6	70,1
24/4/2020	3-Semana 1	65,8	68,3	63,7	66,9	68,1	66,0
25/4/2020	3-Semana 1	69,9	72,7	66,9	72,1	73,2	71,0
26/4/2020	3-Semana 1	71,2	73,4	68,1	75,1	77,9	73,5
27/4/2020	3-Semana 2	67,9	69,8	65,3	69,6	71,1	68,7
28/4/2020	3-Semana 2	66,9	69,3	65,0	69,0	70,3	67,9
29/4/2020	3-Semana 2	66,7	67,6	65,5	67,4	67,6	67,1
30/4/2020	3-Semana 2	68,9	71,8	66,5	70,3	71,5	69,2
1/5/2020	3-Semana 2	69,1	71,7	66,5	70,9	72,3	69,8
2/5/2020	3-Semana 2	69,1	71,7	66,5	70,9	72,3	69,8
3/5/2020	3-Semana 2	69,1	71,7	66,5	70,9	72,3	69,8
4/5/2020	3-Semana 3	70,4	73,8	66,9	73,1	74,9	71,7
5/5/2020	3-Semana 3	69,6	73,4	66,1	70,9	72,9	69,2
6/5/2020	3-Semana 3	71,7	74,0	69,2	75,0	76,6	73,7
7/5/2020	3-Semana 3	66,1	67,1	64,2	66,0	66,3	65,7
8/5/2020	3-Semana 3	66,9	68,7	65,2	67,7	68,3	67,4
9/5/2020	3-Semana 3	74,8	75,5	74,0	76,7	78,7	75,2
10/5/2020	3-Semana 3	70,7	72,7	69,2	69,9	70,6	69,3
11/5/2020	3-Semana 4	71,2	72,6	69,9	70,5	71,2	70,0
12/5/2020	3-Semana 4	73,2	76,7	68,9	75,8	77,3	73,8
13/5/2020	3-Semana 4	68,0	69,6	65,7	69,3	70,1	68,6
14/5/2020	3-Semana 4	69,8	71,2	68,6	68,2	68,4	68,0
15/5/2020	3-Semana 4	70,3	72,5	67,7	71,1	71,1	71,1
16/5/2020	3-Semana 4	70,3	72,5	67,7	71,1	71,1	71,1
17/5/2020	3-Semana 4	70,3	72,5	67,7	71,1	71,1	71,1

Anexo 2: Principales costos para puesta en marcha del SEE

Inversión:

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Ventilador Evolution XC 52"	unitario	2	¢472 500	¢945 000
Motor eléctrico 1 ph - 1.5 HP	unitario	2	¢221 680	¢443 360
Polea de 1,5" 1A	unitario	2	¢30 000	¢60 000
Cable 3x10 awg	metros	25	¢3 375	¢84 375
Microaspersor, Rotor vertical, Boq 170L Gris	unitario	4	¢403	¢1 612
Rotor verde 360° para rondo invertido	unitario	4	¢150	¢600
Conector cónico para rondo macho	unitario	4	¢103	¢412
Final de línea 16 mm	unitario	5	¢46	¢230
Politubo de riego Azud 16mm	metro	30	¢146	¢4 380
Codo A/R 16x16mm (PLP)	unitario	1	¢552	¢552
Tee A/R 16x16x16mm (PLP)	unitario	1	¢703	¢703
Filtro super-anillos 120 mesh	unitario	1	¢36 716	¢36 716
Quick all-punch 3mm	unitario	1	¢10 441	¢10 441
Manómetro seco	unitario	2	¢3 150	¢6 300
Tubo Sch40 1/2" 1 metro	unitario	3	¢1 195	¢3 585
Adaptador H sch40	unitario	2	¢659	¢1 318
Reducción Sch40 1x1/2"	unitario	1	¢515	¢515
Reducción Sch40 1/2x1/4"	unitario	2	¢599	¢1 198
Te PVC Sch40 1/2"	unitario	2	¢214	¢428
Unión PVC Sch40 1/2"	unitario	2	¢155	¢310
Wet dry PVC Cem	unitario	1	¢2 030	¢2 030
Teflon Alemán 1/2	unitario	1	¢289	¢289
Llave de paso	unitario	1	¢995	¢995
Llave de rosca	unitario	1	¢4 250	¢4 250
Estructura metálica de ventiladores	unitario	4	¢8 510	¢34 040
Mano de obra instalación	jornada	2	¢25 000	¢50 000
Total:			¢1 693 639	\$2 935,61

Operación:

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Consumo de agua ¹	m ³	96,9936	¢2 063,0	¢200 098
Consumo eléctrico ²	kwh	548,08	¢111,8	¢61 270
Total:			¢261 368	\$453,03

¹ Se toma en cuenta una tarifa empresarial de AyA según la Resolución RE-0006-2020 del 11 de diciembre del 2020 [88], para consumos mayores a 121 m³, de acuerdo con lo planteado por SENARA [89] como recomendación de la dotación de agua de 130 l/día por vaca y una estimación para una finca con 50 animales.

² Se toma en cuenta una tarifa industrial de CNFL según Alcance n°83 de la Gaceta n°81 del 28 de abril de 2021 [90], para un costo del kWh en un bloque de consumo menor a 3000 kWh.

Mantenimiento:

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Polea de 1,5" 1A	unitario	1	₺30 000	₺30 000
Cable 3x10 awg	metros	5	₺3 375	₺16 875
Microaspersor, Rotor vertical, Boq 170L Gris	unitario	4	₺403	₺1 612
Rotor verde 360° para rondo invertido	unitario	4	₺150	₺600
Conector cónico para rondo macho	unitario	4	₺103	₺412
Politubo de riego Azud 16mm	metro	10	₺146	₺1 460
Mano de obra instalación	jornada	2	₺25 000	₺50 000
Total:			₺100 959	\$174,99

*Tipo de cambio de referencia del BCCR para el 1-6-2020: ₺ 576,93

Anexo 3: Evaluaciones financieras para casos teóricos propuestos

Caso teórico basado en las observaciones hechas en la EEAVM:

	0	1	2	3	4	5
(+) Ingresos						
Venta leche ¹	0	23 037	23 037	23 037	23 037	23 037
(-) Egresos						
Gastos de operación		-261 368	-261 368	-261 368	-261 368	-261 368
Gastos de mantenimiento		-100 959	-100 959	-100 959	-100 959	-100 959
(-) Inversión	-1 693 639					
(-) Depreciación		-157 837	-157 837	-157 837	-157 837	-157 837
(=) Utilidad antes de impuestos		-497 127	-497 127	-497 127	-497 127	-497 127
(+) Impuesto (5%) ²		0	0	0	0	0
(-) Utilidad después de impuesto		-497 127	-497 127	-497 127	-497 127	-497 127
(+) Depreciación		157 837	157 837	157 837	157 837	157 837
(=) Flujo de caja	-1 693 639	-339 290	-339 290	-339 290	-339 290	-339 290
(+) Valor de recuperación						599 174
TOTAL	-1 693 639	-339 290	-339 290	-339 290	-339 290	259 885
Total actualizado (t₁)	-1 693 639	-302 937	-270 480	-241 500	-215 625	147 466
Total actualizado acumulado (t₁)	-1 693 639	-1 996 576	-2 267 056	-2 508 555	-2 724 180	-2 576 715
Total actualizado (t₂)	-1 693 639	-313 287	-289 277	-267 107	-246 636	174 437
Total actualizado acumulado (t₂)	-1 693 639	-2 006 926	-2 296 203	-2 563 310	-2 809 946	-2 635 509

Diferencia de ITH	1
Horas de estrés por calor	4,5 horas
Leche teórica (lb)	0,029 lb/vaca-día
Leche teórica (kg)	0,013 kg/vaca-día
Tamaño del hato	50 vacas
Leche teórica (kg)	0,651 kg/hato-día
Temporada de estrés por calor	120 días
Precio leche	290 ¢
Leche teórica	79,438 kg/hato-temp

t ₁ = 12,0%
t ₂ = 8,3%

Indicadores económicos

VAN (t ₁):	-2 576 714,55
VAN (t ₂):	-2 635 508,85
TIR:	-58%
Relación beneficio/costo (t ₁):	0,14
Relación beneficio/costo (t ₂):	0,16

Período	Ingresos	Egresos
0	0	0
1	23 037	362 327
2	23 037	362 327
3	23 037	362 327
4	23 037	362 327
5	622 211	362 327

VAN ingresos (t ₁):	423 031
VAN ingresos (t ₂):	493 429
VAN egresos (t ₁):	1 306 107
VAN egresos (t ₂):	1 435 298
VAN egresos+inversión (t ₁):	2 999 746
VAN egresos+inversión (t ₂):	3 128 937

¹ Precio de venta del kilogramo de leche basado en el trabajo de Sanabria [91].

² Valor del impuesto calculado para el primer tramo de la renta, correspondiente al 5 % [92]

Caso teórico basado en una diferencia entre ITH_{max} y ITH_{lim} de 2:

	0	1	2	3	4	5
(+) Ingresos						
Venta leche*	€0	€92 148	€92 148	€92 148	€92 148	€92 148
(-) Egresos						
Gastos de operación		-€261 368	-€261 368	-€261 368	-€261 368	-€261 368
Gastos de mantenimiento		-€100 959	-€100 959	-€100 959	-€100 959	-€100 959
(-) Inversión	-€1 693 639					
(-) Depreciación		-€157 837	-€157 837	-€157 837	-€157 837	-€157 837
(=) Utilidad antes de impuestos		-€428 016	-€428 016	-€428 016	-€428 016	-€428 016
(+) Impuesto (5%)**		€0	€0	€0	€0	€0
(=) Utilidad después de impuesto		-€428 016	-€428 016	-€428 016	-€428 016	-€428 016
(+) Depreciación		€157 837	€157 837	€157 837	€157 837	€157 837
(=) Flujo de caja	-€1 693 639	-€270 178	-€270 178	-€270 178	-€270 178	-€270 178
(+) Valor de recuperación						€599 174
TOTAL	-€1 693 639	-€270 178	-€270 178	-€270 178	-€270 178	€328 996
Total actualizado (t_1)	-€1 693 639	-€241 231	-€215 385	-€192 308	-€171 703	€186 681
Total actualizado acumulado (t_1)	-€1 693 639	-€1 934 870	-€2 150 254	-€2 342 562	-€2 514 265	-€2 327 584
Total actualizado (t_2)	-€1 693 639	-€249 472	-€230 353	-€212 699	-€196 398	€220 825
Total actualizado acumulado (t_2)	-€1 693 639	-€1 943 111	-€2 173 464	-€2 386 163	-€2 582 561	-€2 361 736

Diferencia de ITH	2
Horas de estrés por calor	4,5 horas
Leche teórica (lb)	0,115 lb/vaca-día
Leche teórica (kg)	0,052 kg/vaca-día
Tamaño del hato	50 vacas
Leche teórica (kg)	2,605 kg/hato-día
Temporada de estrés por calor	120 días
Precio leche	290 €
Leche teórica	317,752 kg/hato-temp

$t_1 = 12,0\%$
$t_2 = 8,3\%$

Indicadores económicos

VAN (t_1):	-€2 327 584,38
VAN (t_2):	-€2 361 736,26
TIR:	-48%
Relación beneficio/costo (t_1):	0,22
Relación beneficio/costo (t_2):	0,25

Período	Ingresos	Egresos
0	€0	€0
1	€92 148	€362 327
2	€92 148	€362 327
3	€92 148	€362 327
4	€92 148	€362 327
5	€691 322	€362 327

VAN ingresos (t_1):	€672 161
VAN ingresos (t_2):	€767 201
VAN egresos (t_1):	€1 306 107
VAN egresos (t_2):	€1 435 298
VAN egresos+inversión (t_1):	€2 999 746
VAN egresos+inversión (t_2):	€3 128 937

¹ Precio de venta del kilogramo de leche basado en el trabajo de Sanabria [91].

² Valor del impuesto calculado para el primer tramo de la renta, correspondiente al 5 % [92]

Caso teórico basado en una diferencia entre ITH_{max} y ITH_{lim} de 4:

	0	1	2	3	4	5
(+) Ingresos						
Venta leche*	€0	€368 593	€368 593	€368 593	€368 593	€368 593
(-) Egresos						
Gastos de operación		-€261 368	-€261 368	-€261 368	-€261 368	-€261 368
Gastos de mantenimiento		-€100 959	-€100 959	-€100 959	-€100 959	-€100 959
(-) Inversión	-€1 693 639					
(-) Depreciación		-€157 837	-€157 837	-€157 837	-€157 837	-€157 837
(=) Utilidad antes de impuestos		-€151 571	-€151 571	-€151 571	-€151 571	-€151 571
(+) Impuesto (5%)**		€0	€0	€0	€0	€0
(=) Utilidad después de impuesto		-€151 571	-€151 571	-€151 571	-€151 571	-€151 571
(+) Depreciación		€157 837	€157 837	€157 837	€157 837	€157 837
(=) Flujo de caja	-€1 693 639	€6 266	€6 266	€6 266	€6 266	€6 266
(+) Valor de recuperación						€599 174
TOTAL	-€1 693 639	€6 266	€6 266	€6 266	€6 266	€605 440
Total actualizado (t_1)	-€1 693 639	€5 595	€4 995	€4 460	€3 982	€343 543
Total actualizado acumulado (t_1)	-€1 693 639	-€1 688 044	-€1 683 049	-€1 678 589	-€1 674 607	-€1 331 064
Total actualizado (t_2)	-€1 693 639	€5 786	€5 342	€4 933	€4 555	€406 377
Total actualizado acumulado (t_2)	-€1 693 639	-€1 687 853	-€1 682 511	-€1 677 578	-€1 673 023	-€1 266 646

Diferencia de ITH	4
Horas de estrés por calor	4,5 horas
Leche teórica (lb)	0,459 lb/vaca-día
Leche teórica (kg)	0,208 kg/vaca-día
Tamaño del hato	50 vacas
Leche teórica (kg)	10,418 kg/hato-día
Temporada de estrés por calor	120 días
Precio leche	290 €
Leche teórica	1271,009 kg/hato-temp

$t_1 = 12,0\%$
$t_2 = 8,3\%$

Indicadores económicos

VAN (t_1):	-€1 331 063,69
VAN (t_2):	-€1 266 645,91
TIR:	-18%
Relación beneficio/costo (t_1):	0,49
Relación beneficio/costo (t_2):	0,52

Período	Ingresos	Egresos
0	€0	€0
1	€368 593	€362 327
2	€368 593	€362 327
3	€368 593	€362 327
4	€368 593	€362 327
5	€599 174	€362 327

VAN ingresos (t_1):	€1 459 532
VAN ingresos (t_2):	€1 614 889
VAN egresos (t_1):	€1 306 107
VAN egresos (t_2):	€1 435 298
VAN egresos+inversión (t_1):	€2 999 746
VAN egresos+inversión (t_2):	€3 128 937

¹ Precio de venta del kilogramo de leche basado en el trabajo de Sanabria [91].

² Valor del impuesto calculado para el primer tramo de la renta, correspondiente al 5 % [92]

Caso teórico basado en una diferencia entre ITH_{max} y ITH_{lim} de 6:

	0	1	2	3	4	5
(+) Ingresos						
Venta leche*	€0	€829 334	€829 334	€829 334	€829 334	€829 334
(-) Egresos						
Gastos de operación		-€261 368	-€261 368	-€261 368	-€261 368	-€261 368
Gastos de mantenimiento		-€100 959	-€100 959	-€100 959	-€100 959	-€100 959
(-) Inversión	-€1 693 639					
(-) Depreciación		-€157 837	-€157 837	-€157 837	-€157 837	-€157 837
(=) Utilidad antes de impuestos		€309 170	€309 170	€309 170	€309 170	€309 170
(+) Impuesto (5%)**		-€15 458	-€15 458	-€15 458	-€15 458	-€15 458
(=) Utilidad después de impuesto		€293 711	€293 711	€293 711	€293 711	€293 711
(+) Depreciación		€157 837	€157 837	€157 837	€157 837	€157 837
(=) Flujo de caja	-€1 693 639	€451 548	€451 548	€451 548	€451 548	€451 548
(+) Valor de recuperación						€599 174
TOTAL	-€1 693 639	€451 548	€451 548	€451 548	€451 548	€1 050 723
Total actualizado (t_1)	-€1 693 639	€403 168	€359 972	€321 403	€286 967	€596 208
Total actualizado acumulado (t_1)	-€1 693 639	-€1 290 471	-€930 499	-€609 096	-€322 129	€274 080
Total actualizado (t_2)	-€1 693 639	€416 942	€384 988	€355 483	€328 239	€705 254
Total actualizado acumulado (t_2)	-€1 693 639	-€1 276 697	-€891 709	-€536 225	-€207 986	€497 268

Diferencia de ITH	6
Horas de estrés por calor	4,5 horas
Leche teórica (lb)	1,034 lb/vaca-día
Leche teórica (kg)	0,469 kg/vaca-día
Tamaño del hato	50 vacas
Leche teórica (kg)	23,441 kg/hato-día
Temporada de estrés por calor	120 días
Precio leche	290 €
Leche teórica	2859,771 kg/hato-temp

$t_1 = 12,0\%$
$t_2 = 8,3\%$

Indicadores económicos

VAN (t_1):	€274 079,73
VAN (t_2):	€497 268,36
TIR:	18%
PR (t_1):	4,54 años
PR (t_2):	4,29 años
Relación beneficio/costo (t_1):	1,09
Relación beneficio/costo (t_2):	1,16

Período	Ingresos	Egresos
0	€0	€0
1	€829 334	€377 785
2	€829 334	€377 785
3	€829 334	€377 785
4	€829 334	€377 785
5	€1 428 508	€377 785

VAN ingresos (t_1):	€3 329 550
VAN ingresos (t_2):	€3 687 442
VAN egresos (t_1):	€1 361 831
VAN egresos (t_2):	€1 496 535
VAN egresos+inversión (t_1):	€3 055 470
VAN egresos+inversión (t_2):	€3 190 174

¹ Precio de venta del kilogramo de leche basado en el trabajo de Sanabria [91].

² Valor del impuesto calculado para el primer tramo de la renta, correspondiente al 5 % [92]