



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad De Medicina Veterinaria y Zootecnia

Estimación de parámetros genéticos en vacas Suizo Pardo bajo estrés calórico en la comunidad de Puerto Progreso, Mérida, Yucatán.

Tesis

para obtener el título de:

Médico Veterinario Zootecnista

Presenta:

Miguel Angel Vidals Meza

Directores de tesis:

MVZ. M.C. Sandra Giovanna Núñez Soto

MVZ. M.C. Raymundo Ávila Benítez

Asesores de tesis:

MVZ. Ph.D. Hugo Oswaldo Toledo Alvarado

MVZ. M.Sc. Pedro Ochoa Galván

Tecamachalco, Puebla septiembre de 2023.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a DIOS, por guiarme y permitirme disfrutar de la vida maravillosa que me ha dado.

A mis padres, Miguel Angel Vidals Alonso y María de los Ángeles Meza Navarrete por apoyarme incondicionalmente en mis estudios, decisiones y en todo momento que lo requería, a mi hermano Alberto Vidals por formar parte de mi niñez y compartir gratos momentos.

A mis tíos, especialmente a Moisés Vidals, Angelica Vidals y Cenobio Vidals por estar siempre al pendiente de mi persona, apoyarme y motivarme en todo momento.

A mi Alma Mater la “Benemérita Universidad Autónoma de Puebla”, con singular aprecio a la “Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia”, quien me proporcionó la formación académica y profesional.

A mis maestros que fueron parte fundamental de mi enseñanza y aprendizaje para culminar con mi formación de Médico Veterinario. En especial a la Dra. Ruby Moreno por brindarme un conocimiento amplio del quehacer del Médico Veterinario y apasionarme más de la profesión en sus diversas áreas; al Dr. Raymundo Ávila, quien siempre ha estado al pendiente de todo el proceso de mi etapa final de mi carrera universitaria, a la Dra. Sandra Núñez por guiarme y darme una oportunidad de involucrarme en el grandioso mundo de la genética cuantitativa. A mis asesores de tesis, Dr. Hugo Toledo y Dr. Pedro Ochoa por ser parte del proceso de tesis.

A todos mis compañeros que fueron parte fundamental de la vida universitaria y con grato cariño a Reyna Ramírez, Ana Gómez y Karina Domínguez con quienes compartí muchos momentos de alegrías, tristezas y apoyo mutuo.

Agradezco al proyecto PAPIIT programa IN221619, por el financiamiento del proyecto de investigación para la recolecta de los datos, a la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma de Yucatán y al rancho San Pedro por prestar sus instalaciones y recursos biológicos.

Finalmente, agradezco a todas las personas que formaron parte de mi proceso profesional y personal. ¡Muchas gracias!

DEDICATORIA

Dedico esta tesis con especial amor y cariño a mis padres María de los Ángeles Meza Navarrete y Miguel Angel Vidals Alonso por su dedicación, esfuerzo, sacrificio, y por haberme forjado con buenos valores y hábitos, que han hecho que deje una huella en los lugares que estado, gracias a ellos no hubiera sido posible adquirir los conocimientos, habilidades y destrezas para cumplir mis metas trazadas y seguirme desarrollando en todos los ámbitos.

A mis tíos Angelica Vidals Alonso, Cenobio Vidals Alonso y Moisés Vidals Alonso por siempre estar, preocuparse y motivarme en todo momento durante el proceso de mis estudios y hacia mi persona.

III Firmas

Firma del Alumno:

Nombre:

Miguel Angel Vidals Meza

Firma:



Firma de Directores de Tesis:

Nombre:

Sandra Giovanna Núñez Soto

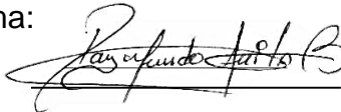
Firma:



Nombre:

Raymundo Ávila Benítez

Firma:



Firma de Asesores de Tesis:

Nombre:

Hugo Oswaldo Toledo Alvarado

Firma:



Nombre:

Pedro Ochoa Galván

Firma:



IV Dictamen de Comisión Revisora.

() APROBADO () A REVISION () RECHAZADO

Nombre:

Firma:

Observaciones y Recomendaciones:

ÍNDICE

	Págs.
AGRADECIMIENTOS.....	II
DEDICATORIA	III
LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE GRÁFICOS Y FIGURAS.....	IX
FÓRMULA	X
RESUMEN	1
I. INTRODUCCIÓN	3
II. ANTECEDENTES DEL PROYECTO	5
2.1 Estrés calórico.	5
2.2 Técnicas usadas para medir el estrés calórico en ganado lechero.	6
2.3 Estimación de parámetros genéticos.....	9
2.4 <i>Métodos estadísticos usados para la evaluación genética de la producción de leche en ganado lechero bajo estrés calórico.</i>	10
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
3.1 Lugar de estudio.	16
3.2 Animales y condiciones de manejo.....	16
3.3 Captura de datos.....	17
3.4 Obtención de las variables productivas, fisiológicas y ambientales.	17
3.5 Análisis estadístico.....	20

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
4.1 Variables productivas, fisiológicas y ambientales.....	23
4.1.1. Variables productivas.....	24
4.1.2. Variables fisiológicas.	25
4.1.3. Variables ambientales.	26
4.2 Clasificación del ITH.	30
4.3 Componentes de varianza y parámetros genéticos.....	35
4.4 Correlaciones genéticas y fenotípicas.....	39
V. CONCLUSIÓN.....	42
VI. ANEXOS.....	43
VII. BIBLIOGRAFÍA	49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Promedios de parámetros ambientales, fisiológicos y de producción de leche en ganado Holstein y Suizo Pardo bajo estrés calórico.	7
Tabla 2. Fórmulas del ITH utilizado por diversos autores en poblaciones de Holstein y sus cruzas y Suizo Pardo.	8
Tabla 3. Heredabilidades y repetibilidades reportadas por diversos autores en ganado lechero Holstein y Suizo Pardo con una producción ajustada a 305 días.	10
Tabla 4. Promedios, desviaciones estándar, mínimos y máximos de las variables productivas, fisiológicas y ambientales en la población de vacas Suizo Pardo del rancho San Pedro, tomadas en el periodo octubre 2019 – diciembre 2020.	23
Tabla 5. Clasificación del estrés calórico de acuerdo con el ITH calculado en la población Suizo Pardo del rancho San Pedro.	31
Tabla 6. Promedios y desviaciones estándar de las variables fisiológicas y ambientales encontradas dentro de cada categoría del ITH en la población de vacas Suizo Pardo.	33
Tabla 7. Estimación de las varianzas genéticas aditivas, de ambiente permanente (sobre la diagonal) residual y sus covarianzas (arriba de la diagonal) con los diferentes coeficientes de los polinomios de Legendre orden cuatro.	35
Tabla 8. Heredabilidad y repetibilidad con diferentes ordenes de los polinomios de Legendre (del uno al cuatro) en la población de vacas Suizo Pardo.	37
Tabla 9. Correlaciones genéticas de la producción de leche ajustada a 305 días con la frecuencia respiratoria, temperatura rectal e índice temperatura-humedad	39
Tabla 10. Correlaciones fenotípicas de la producción de leche total ajustada a 305 días con la frecuencia respiratoria, temperatura rectal e Índice de temperatura-humedad	40

LISTA DE GRÁFICOS Y FIGURAS

Gráfico 1.- Temperaturas ambientales promedio en Progreso, Mérida, Yucatán durante el periodo 1961 a 2020.	5
Gráfico 2.- Comportamiento de la producción de leche ajustada a 305 días y del ITH a través de los días transcurridos	24
Gráfico 3.- Variación de la temperatura ambiental, la humedad relativa y la interacción de ambas a través del ITH durante los diferentes meses de muestreo.	27
Gráfico 4.- Comportamiento de las variables fisiológicas, la producción de leche diaria y el ITH a través del periodo transcurrido de muestreo (octubre 2019 - diciembre 2020).....	29
Gráfico 5.- Porcentaje del número de observaciones dentro de cada categoría del ITH en la población de vacas Suizo Pardo	31
Gráfico 6.- Varianzas de genética aditiva, ambiente permanente y residual en los diferentes días en leche.....	36
Gráfico 7.- Heredabilidades y repetibilidades durante los días en producción de leche.	37
Gráficos 8-18.- Porcentaje del número de observaciones dentro de cada categoría del ITH por lactación.....	43
Figura 1. Imágenes dinámicas de la temperatura corporal de una vaca durante la ordeña e instalaciones del rancho San Pedro..	18
Figura 2. Correlaciones fenotípicas entre las variables productivas, fisiológicas y ambientales de la población de vacas Suizo Pardo del rancho San Pedro.	48

FORMULAS

f1. Regresión lineal múltiple para el ajuste de la producción de leche a 305 días.....	17
f2. Calculo de la producción de leche total a 305 días	18
f3. Calculo del ITH.....	19
f4. Modelo de regresión aleatoria en su formula matricial	20
f5. Modelo de regresión aleatoria con la población del rancho San Pedro.....	21
f6. Calculo de la heredabilidad en sentido estricto.....	22
f7. Calculo de la repetibilidad.....	22
f8. Calculo de la varianza total.....	22

ABREVIATURAS

CTG: Temperatura de cámara termográfica
DEL: Días en producción de leche
EC: Estrés calórico
FR: Frecuencia respiratoria por minuto
h²: Heredabilidad
HO: Raza Holstein
HR: Humedad relativa
ITH: índice temperatura-humedad
PL: Producción de leche diaria
PLT: Producción de leche total ajustada a 305 días
re: Repetibilidad
rpm: Respiraciones por minuto
SP: Raza Suizo Pardo
TA: Temperatura ambiental
TI: Temperatura infrarroja
TR: Temperatura rectal

RESUMEN

El calentamiento global que ha ido en aumento en los últimos años, repercute en el estrés calórico (EC) afectando de forma muy directa el bienestar del animal y reflejándose en la disminución de la producción, reproducción y la economía de los hatos, ocasionando desabasto de leche y subproductos lácteos en la población humana actual, por lo tanto, es necesario conocer que tanto se hereda el estrés calórico de una generación a la siguiente para poder tomar decisiones de selección de los animales, y esto solo se puede hacer a través del conocimiento de los parámetros genéticos de una población. El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar los parámetros genéticos asociados a la producción láctea bajo estrés calórico en ganado lechero de la raza Suizo Pardo utilizando un modelo lineal mixto de regresión aleatoria para poder conocer la trayectoria fenotípica y genética de los rasgos fisiológicos que dependen de un Índice temperatura-humedad (ITH) continuo. En la comunidad de Puerto Progreso, Mérida, Yucatán, se realizaron muestreos cada tercer día de la temperatura rectal (TR), temperatura corporal, frecuencia respiratoria (FR), temperatura ambiental (TA) y humedad relativa (HR). Mensualmente se registró los litros de leche por día del hato en producción, posteriormente se calculó el ITH y se obtuvieron los parámetros genéticos y las correlaciones genéticas y fenotípicas entre la producción de leche con el ITH, la FR y la TR. La producción de leche diaria (PL), la producción de leche ajusta a 305 días (PLT) y los días en producción (DEL) fueron de 16.30 ± 4.84 kg, 5027.23 ± 244.67 kg y 355.05 ± 81.72 días, respectivamente, mientras que la temperatura infrarroja (TI), temperatura de cámara termográfica (CTG), TR y FR obtenidas oscilaron en 32.03 ± 1.88 °C, 34.66 ± 1.76 °C, 37.55 ± 0.72 °C y 47.16 ± 12.9 rpm, respectivamente. Las heredabilidades y repetibilidades variaron entre 0.03 a 0.19 y 0.50 a 0.59, respectivamente. Las correlaciones genéticas y fenotípicas con la producción de leche fueron negativas para el ITH (-0.86) y la FR (-0.61,-0.03), en cambio, la correlación genética de la TR fue positiva (0.74). La población estudiada demostró una autorregulación de la FR y TR bajo las condiciones climatológicas adversas presentadas desarrollando una resistencia al estrés calórico.

Palabras clave: *Parámetros genéticos, estrés calórico, Suizo Pardo, índice temperatura-humedad, Cámara termográfica, Mérida.*

Abstract

Global warming which has been increasing in recent years, has had an impact on heat stress (EC), directly affecting animal welfare, and is reflected in the decrease in production, reproduction and herd economy, causing a shortage of milk and dairy by-products in the current human population, therefore, it is necessary to know how much heat stress is inherited from one generation to the next in order to make animal selection decisions, and this can only be done through knowledge of the genetic parameters of a population. The aim of this work was to evaluate the genetic parameters associated with milk production under heat stress in Brown Swiss dairy cattle using a mixed linear random regression model to understand the phenotypic and genetic trajectory of physiological traits that depend on a continuous temperature-humidity index (ITH). In the community of Puerto Progreso, Mérida, Yucatán, rectal temperature (TR), body temperature, respiratory rate (FR), ambient temperature (TA) and relative humidity (HR) were sampled every third day. Monthly, the liters of milk per day of the herd in production were recorded, and then the ITH was calculated and the genetic parameters and genetic and phenotypic correlations between milk production with the ITH, FR and TR were obtained. Daily milk yield (PL), 305-day adjusted milk yield (PLT) and the days in milk (DEL) were 16.30 ± 4.84 kg, 5027.23 ± 244.67 kg and 355.05 ± 81.72 days, respectively, while the infrared temperature (TI), thermographic camera temperature (CTG), TR and FR obtained ranged from 32.03 ± 1.88 °C, 34.66 ± 1.76 °C, 37.55 ± 0.72 °C and 47.16 ± 12.9 rpm, respectively. The heritabilities and repeatabilities ranged from 0.03 to 0.19 and 0.50 to 0.59, respectively. Genetic and phenotypic correlations with milk yield were negative for ITH (-0.86, -0.21) and FR (-0.61, -0.13, in contrast, the genetic correlation of TR was positive (0.74). The studied population demonstrated autoregulation of FR and TR under the adverse climatic conditions presented by developing resistance to heat stress.

Keywords: *Genetic parameters, heat stress, Brown Swiss, temperature-humidity index, thermographic camera, Mérida.*

I. INTRODUCCIÓN

Para finales del siglo XXI, la temperatura promedio de la superficie incrementará de 2 a 6 °C, afectando la intensidad y la propagación de fenómenos meteorológicos extremos como sequías, huracanes, calor, olas e inundaciones (*Al-ghussain, 2019*).

El cambio climático que actualmente estamos viviendo, se ve reflejado en la productividad de la cadena alimenticia para el consumo humano, a través de una disminución en la producción de productos y subproductos lácteos. Por lo anterior es necesario conocer la información genética de las razas bovinas lecheras adaptadas a la región para abastecer la demanda alimenticia actual (*Pérez M., 2017*).

El objetivo del mejoramiento genético de bovinos productores de leche consiste en obtener una población animal con características deseables, a través de una selección de los individuos sobresalientes de la población, con el fin de aprovechar el valor genético transmitido a sus descendientes. Es importante la valoración genética de reproductores y reproductoras a través de los parámetros genéticos y el uso de las correlaciones genéticas y fenotípicas a través del tiempo, para evaluar la mejora genética de la característica de interés en las poblaciones animales (*Ochoa, 1991 y Hernández et al., 2016*). Los programas de mejoramiento genético deben estar basados en los registros diarios de producción, reproducción, progenie, entre otros, que llevan a cabo cada uno de los ranchos; y es la base para a través de los análisis estadísticos conocer cuáles fueron los principales factores que influyeron en la expresión del potencial genético y su reflejo en la producción alcanzada. (*Ochoa, 1991 y Hernández et al., 2016*).

Los parámetros genéticos como los índices de heredabilidad (h^2) se consideran como el factor determinante para la selección genética, ya que determina la cantidad de variación total encontrada en una característica que es atribuida al efecto directo de los genes (*Ochoa, 1991, Pérez M., 2017*), a partir de esto y junto con las correlaciones genéticas y fenotípicas entre variables, se pueden plantear estrategias para la selección del ganado lechero en condiciones de estrés calórico.

Los valores de temperatura ambiental crítica alta en vacas lecheras varía entre 25 y 26 °C (*Dikmen y Hansent, 2009 y Espinoza et al., 2011*), en el estudio que se realizó en el estado de Yucatán, la temperatura ambiental media anual es de 26 °C y

la humedad relativa promedio es de 78 y 80 en los meses de noviembre-abril y mayo-octubre, respectivamente (INEGI, 2021), bajo estas circunstancias ambientales el bienestar del ganado vacuno lechero se ve afectado, recurriendo a un desequilibrio en el proceso de homeostasis (Corrales, 2014).

La capacidad calórica corporal normal de los animales homeotermos es definida como la cantidad de energía calórica que puede mantenerse sin evidenciar cambios en el funcionamiento vital, la conducta y el estado de equilibrio homeostático (mantener una condición constante o estable del ambiente interno del individuo), homeocinético (mantener funciones corporales críticas a expensas de otras funciones fisiológicas) y homeorrético (prioridad del uso de nutrientes para distintas funciones metabólicas) (Araúz et al., 2010).

El estrés calórico afecta en primera instancia y de manera negativa el consumo de alimento, la producción láctea y la reproducción (Leyva et al., 2015, Cerqueira et al., 2016 y Polsky et al., 2017) y cuando se presenta un proceso crónico desencadena enfermedades metabólicas que en ocasiones si no son detectadas a tiempo, llega a la muerte del individuo (Barragán et al., 2015), finalmente esto se ve reflejado en pérdidas económicas para el productor.

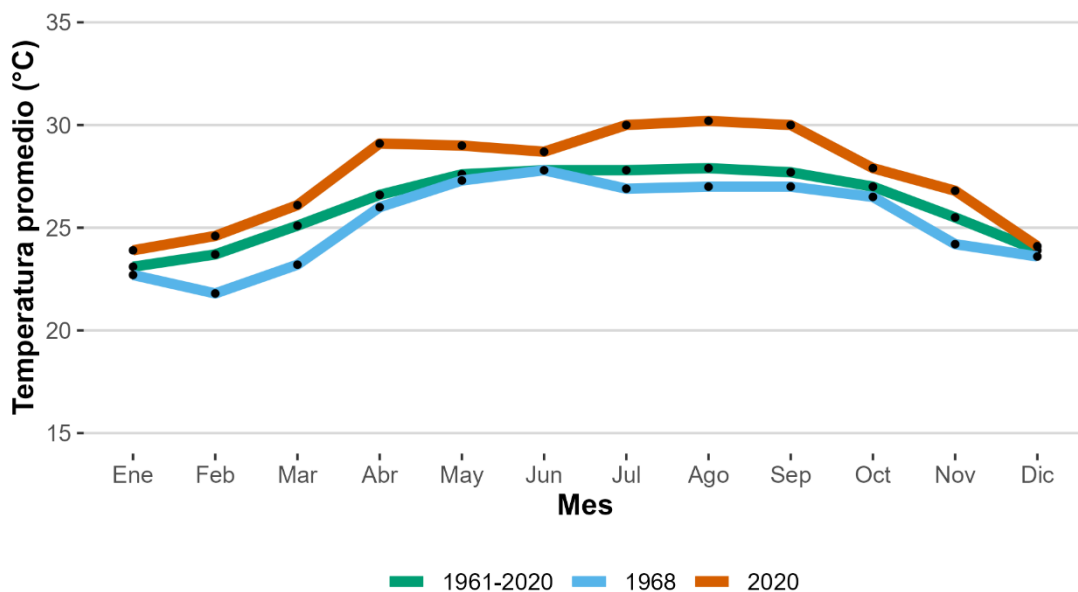
El ITH es la técnica más usada para medir el estrés calórico (Dikmen y Hansen, 2009, Cerqueira et al., 2016 y Enríquez et al., 2020), el cual lleva valores intrínsecos de temperatura ambiental y la humedad relativa; sin embargo, se complementa con otros parámetros como la frecuencia respiratoria y temperatura rectal (Espinoza et al., 2011 y Barragán et al., 2015). Dicho índice está categorizado por: <72 no hay condiciones de estrés para el ganado lechero, leve de 72 a 78, moderado de 79 a 88, grave (>89), y una vez ajustado con relación a otros factores climáticos como el viento y la radiación, resulta de utilidad para orientar las prácticas ganaderas (Espinoza et al., 2011, Cerqueira et al., 2016). El presente trabajo tiene como objetivo conocer los parámetros genéticos asociados a la producción láctea en vacas de la raza Suizo Pardo en condiciones de estrés calórico, a través de indicadores fisiológicos y ambientales utilizando un modelo lineal mixto de regresión aleatoria para conocer el componente genético de esa población a través de las fluctuaciones de temperatura y humedad del medio ambiente en donde producen.

II. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

2.1 Estrés calórico.

Los cambios ambientales han obligado a seleccionar poblaciones animales con mejores parámetros genéticos, esto en relación con la adaptabilidad que debe realizar la población animal en épocas de mayor calor, donde: el bienestar animal, el desempeño productivo y reproductivo y la salud animal, se ven afectados (*Cerqueira et al., 2016* y *Pérez M., 2017*). Las condiciones climáticas ideales para la producción de leche se producen a temperatura ambiental entre 5 y 25 °C, siendo este intervalo considerado la zona de confort térmico (*Cerqueira et al., 2016*). La temperatura ambiental y la humedad, así como su efecto combinado, son marcadores ambientales asociados al estrés calórico en vacas lecheras; sin embargo, la humedad relativa es la variable climática que favorece el incremento de la carga calórica en la vaca, relacionándose negativamente con la frecuencia respiratoria y la producción de leche en el ganado (*Leyva et al., 2015*). En la comunidad de Progreso, Mérida, Yucatán la temporada de temperaturas ambientales promedio más altas en el periodo 1961 a 2020 se registraron de mayo a septiembre, en el año más frío (1968) fue en mayo y en el año más caluroso (2020) estuvo entre los meses de julio y septiembre, ver gráfico 1 (INEGI, 2021).

Gráf. 1 Temperaturas promedio registradas por mes en Progreso, Mérida, Yucatán (1961-2020).



Fuente: INEGI, 2021.

El EC es la incapacidad que tiene el animal para mantener en homeostasis su temperatura corporal (*Barragán et al., 2015*), es por ello que las vacas lecheras son más susceptibles por la demanda de nutrientes que genera la producción de leche y bajo esta susceptibilidad las razas *Bos indicus* a través de los años han ido evolucionando mecanismos para la resistencia del estrés calórico en comparación con las razas *Bos taurus* (*Araúz et al., 2010* y *Espinoza et al., 2011*). Por otro lado, las vacas lecheras en producción tienen una mayor sensibilidad al estrés calórico en comparación con vacas secas, debida a la producción de leche, por consiguiente, eleva el metabolismo (*Araúz et al., 2010; Carabaño et al., 2016; Cerqueira et al., 2016* y *Polsky et al., 2017*).

Las razas Jersey y Suizo Pardo llegan a disminuir de 50 % a 75 % la producción láctea en temperaturas ambientales que superan los 29.5 °C y las vacas Holstein en temperaturas superiores a 26.5 °C (*Pérez M., 2017*); momento en el cual se activan mecanismos de pérdida de calor por vía sensible (radiación, convección y conducción) y al no ser suficiente se activa la vía evaporativa (sudoración y jadeo) (*Leyva et al., 2015*).

2.2 Técnicas usadas para medir el estrés calórico en ganado lechero.

El EC se ha medido durante varios años principalmente a través de variables ambientales y fisiológicas, dentro del primer grupo está la temperatura ambiental, la humedad relativa, la velocidad del viento, la radiación solar, la precipitación y el ITH; la temperatura rectal, la temperatura vaginal, la temperatura corporal, la frecuencia respiratoria y el gasto cardiaco, son variables fisiológicas que cambian a través de las condiciones ambientales adversas (*Espinoza et al., 2011; Leyva et al., 2015; Cerqueira et al., 2016*).

En la tabla 1, se muestran los resultados de promedios de parámetros ambientales, fisiológicos y de producción de leche en ganado Holstein y Suizo Pardo bajo EC obtenidos por diversos autores en diferentes países y ambientes.

Tabla 1. Promedios de parámetros ambientales, fisiológicos y de producción de leche en ganado Holstein y Suizo Pardo bajo estrés calórico.

RAZA	PARÁMETROS					PAÍS	AUTORES	AÑO
	TA (°C)	ITH	TR \bar{X} (°C)	FR (rpm)	PL \bar{X} (Kg)			
HO(m)	29.3 ± 2.4	77.2 ± 2.5	38.8 ± 0.08	35.5 ± 1.7		Uruguay	Saravia C.	2009
HO (t)	29.3 ± 2.4	77.2 ± 2.5	40.2 ± 0.16	79.2 ± 3.5		Uruguay	Saravia C.	2009
HO	32.47	87.66	40.06 ± 0.6		22.33 ± 6.19	Panamá	Araúz et al.	2010
HO		<72	37.4 ± 0.3	45.3 ± 1.7		México	Espinoza et al.	2011
HO		>72<78	38.5	49.7 ± 0.7		México	Espinoza et al.	2011
HO		>78	39.7	69.6 ± 1.0		México	Espinoza et al.	2011
HO(1l)		66.16 ± 5.7			30.35 ± 8.22	Brasil	Santana et al.	2016
HO(2l)		66.29 ± 5.7			34.05 ± 11.1	Brasil	Santana et al.	2016
HO(3l)		65.99 ± 5.7			35.52 ± 11.7	Brasil	Santana et al.	2016
SP	32.47	87.6	39.68 ± 0.5		15.46 ± 4.45	Panamá	Araúz et al.	2010
SP	40.3 ± 0.9	85 ± 0.8	38.9 ± 0.03			Brasil	Silva et al.	2017
SP(1l)		76			23.35 ± 6.18	Italia	Maggiolino et al.	2020
SP(2l)		75			26.19 ± 8.30	Italia	Maggiolino et al.	2020
SP(3l)		77			27.75 ± 9.08	Italia	Maggiolino et al.	2020
SP(4l)		81			27.44 ± 9.20	Italia	Maggiolino et al.	2020

°C: Grados Celsius, HO: Holstein, SP: Suizo Pardo, TA: Temperatura Ambiental, ITH: Índice de temperatura-humedad, TR \bar{X} : Temperatura Rectal promedio, FR: Frecuencia Respiratoria, PL \bar{X} : Producción de leche por día promedio, 1l, 2l, 3l y 4l: Lactación 1, 2, 3 y 4, respectivamente, m= mañana, t= tarde.

El ITH es un índice que corrige el valor de la temperatura con el grado de humedad, siendo el indicador más usado y objetivo para saber el riesgo de padecer estrés por calor, calculando la fórmula: $ITH = (1.8 Ta + 32) - (0.55 - 0.55 HR)$ ($1.8 Ta - 26$) (Fernández et al., 2019), donde Ta es la temperatura ambiental expresada en grados Celsius, por lo que el termino ($1.8 x Ta + 32$), representa la conversión de los datos de temperatura en grados Fahrenheit (el agua se congela a 0 °C (32 °F) y hierve a 100 °C (212 °F), lo que indica una diferencia de 100° en °C (180° en °F), por lo tanto en cada grado en la escala Celsius es igual a 180/100 o 9/5 grados (1.8) en la escala Fahrenheit) y HR es la humedad relativa expresada en porcentaje (Maggiolino et al., 2020)

En las vacas lecheras hay estrés calórico cuando el ITH es mayor a 72, en ganado de carne cuando el ITH es mayor a 75 y en F1 (Holstein x Cebú) el ITH es

mayor a 79 puntos (Barragán et al., 2015). Dentro de las razas lecheras, el ganado Holstein se ve más afectada por ITH, así mismo aumenta la frecuencia respiratoria en las horas críticas del día (Espinoza et al., 2011 y Leyva et al., 2015). Las altas correlaciones fenotípicas encontradas entre la frecuencia respiratoria y la temperatura rectal con el ITH (0,83 y 0,79, respectivamente), sugieren estos indicadores fisiológicos excelentes como predictores de estrés (Cerqueira et al., 2016). Diversos autores han realizado estudios en ganado lechero bajo EC donde involucran al ITH y al mismo tiempo han hecho modificaciones en la fórmula para adaptar la a varios ambientes (Tabla 2).

Tabla 2. Fórmulas del ITH utilizado por diversos autores en poblaciones de Holstein y sus cruzas y Suizo Pardo.

Autores	Año	País	Formula	Clima
Caiza V.E.	2021	Ecuador	$ITH = (1,8 \times T^{\circ} + 32) - (0,55 - 0,55 \times hr/100) \times (1,8 \times T^{\circ} - 26)$	Am
Maggiolino et al.	2020	Italia	$THI = (1,8 \times T_a + 32) - (0,55 - 0,55 \times RH) \times [(1,8 \times T_a + 32) - 58]$	Cfa
Enríquez y Álvarez	2020	Cuba	$ITH = 0,8 \times T_m + ((HR/100) \times (T_m - 14,3)) + 46,4$	Aw
Oliveira et al.	2019	Brasil	$THI1 = 0,4 \times (T_{db} + T_{wb}) \times 1,8 + 32 + 15$ $THI2 = (T_{db} \times 0,15 + T_{wb} \times 0,85) \times 1,8 + 32$ $THI3 = (T_{db} \times 0,35 + T_{wb} \times 0,65) \times 1,8 + 32$ $THI4 = 0,72 \times (T_{db} + T_{wb}) + 40,6$ $THI5 = (1,8 \times T_{db} + 32) - [(0,55 - 0,0055 \times RH) \times (1,8 + T_{db} - 26,0)]$ $THI6 = (0,55 \times T_{db} + 0,2 \times T_{dp}) \times 1,8 + 32 + 17,5$ $THI7 = T_{db} + (0,36 \times T_{dp}) + 41,2$ $THI8 = (0,8 \times T_{db}) + [(RH/100) \times (T_{db} - 14,4)] + 46,4$ $THI9 = 3,43 + 1,058 \times T_{db} - 0,293 \times RH + 0,0164 \times T_{db} \times RH + 35,7$	Aw
Fernández et al.	2019	México	$THI = (1,8 \times T + 32) - (0,55 - 0,55 \times RH) \times (1,8 \times T \times 26)$	BSh
Kíbar et al.	2018	Turquía	$THI = (0,8 \times T_{db}) + [(RH/100) \times (T_{db} - 14,4)] + 46,4$	Csa
Fodor et al.	2018	Reino Unido	$THI = T + 0,36 \times T_{dew} + 41,2$ $THI = 1,8 \times T + 32 - (0,55 - 0,0055 \times RH) \times (1,8 \times T - 26)$	Cfb
Silva et al.	2017	Brasil	$THI = 0,8 \times T + (RH/100) \times (T - 14,4) + 46,4$	BSh
Gantner et al.	2017	Croacia	$THI = 1,8 \times T_a - (1 - HR) \times (T_a - 14,3) + 32$	Cfa
Macciotta et al.	2017	Italia	$THI = (1,8 \times T_a + 32) - (0,55 - 0,55 \times RH) \times [(1,8 \times T_a + 32) - 58]$	Csa
Cerqueira et al.	2016	Portugal	$ITH = 1,8T_a - (1 - HR) (T_a - 14,3) + 32$	Csb
Santana et al.	2016	Brasil	$THI = (1,8 \times T + 32) - (0,55 - (0,0055 \times RH) \times (1,8 \times T - 26))$	Aw y Cfa
Carabaño et al.	2016	Europa	$THI = (1,8 \times T_{db} + 32) - [(0,55 - 0,0055 \times RH) \times (1,8 \times T_{db} - 26)]$	Cfb, Dfb y Bsh
Ammer et al.	2016	Alemania	$THI = (1,8 \times T + 32) - (0,55 - 0,0055 \times RH) \times (1,8 \times T - 26)$	Cfb
Nguyen et al.	2016	Australia	$THI = T_{db} + (0,36T_{dp}) + 41,2$	Cfb
Yadav et al.	2016	India	$THI = (1,8T + 32) - [(0,0055RH) (1,8T - 26)]$	Cwa
Leyva et al.	2015	México	$ITH = 0,81 (T_a^{\circ}C) + HR (T_a^{\circ}C - 14,4) + 46,4$	BSh
Boonkum y Duangjinda	2015	Tailandia	$THI = (1,8 \times temp + 32) - (0,55 - 0,0055 \times RH) \times (1,8 \times temp - 26)$	Aw
Bernabucci et al.	2014	Italia	$THI = (1,8 \times T_a + 32) - (0,55 - 0,55 \times RH) \times [(1,8 \times T_a + 32) - 58]$	Cfa
Lucena C.	2014	Venezuela	$ITH = (^{\circ}F/9/5 + 32) - (0,55 - (0,55 \times (HR \times 0,01))) \times ((^{\circ}F/9/5 + 32) - 58)$	Aw
Dikmen et al.	2014	Estados Unidos	$THI = (1,8 \times T + 32) - [(0,55 - 0,0055 \times RH) \times (1,8 \times T - 26)]$	Cfa

Espinoza et al.	2011	México	$ITH = 1,8 * T_a - (1 - HR) * (T_a - 14,3) + 32$	BWh
Boonkum et al.	2011	Tailandia	$THI = (1,8T + 32) - (0,55 - 0,0055RH) (1,8T - 26)$	Aw
Hernández et al.	2011	México	$THI = 1,8 T + 32 - (0,55 - 0,55 RH) (1,8 T - 26)$	Aw
Saravia C.	2009	Uruguay	$ITH = (1,8 T_a + 32) - (0,55 - 0,55 HR) x (1,8 T_a - 26)$	Cfa
Dikmen y Hansen	2009	Estados Unidos	$THI1 = (1,8 * T_{db} + 32) - [(0,55 - 0,0055 * HR) * (1,8 * T_{db} - 26,8)]$ $THI2 = T_{db} + 0,36 * T_{dp} + 41,2$ $THI3 = (0,35 * T_{db} + 0,65 * T_{wb}) * 1,8 + 32$ $THI4 = (0,55 * T_{db} + 0,2 * T_{dp}) * 1,8 + 32 + 17,5$ $THI5 = (0,15 * T_{db} + 0,85 * T_{wb}) * 1,8 + 32$ $THI6 = [0,4 * (T_{db} + T_{wb})] * 1,8 + 32 + 15$ $THI7 = (T_{db} + T_{wb}) * 0,72 + 40,6$ $THI8 = (0,8 * T_{db}) + [(RH/100) * (T_{db} - 14,4)] + 46,4$	Cfa

T°, A, T, T_a, T_m y temp: Temperatura promedio del aire o ambiental en grados Celsius (°C),
T_{db}: Temperatura del bulbo seco, **T_{wb}:** Temperatura del bulbo húmedo (°C), **T_{dp} y T_{dew}:** Temperatura punto de rocío (°C), **°F:** Temperatura ambiental en grados Fahrenheit (°F), **hr,**
HR o RH: Humedad relativa expresada en porcentaje (%), **ITH o THI:** Índice de temperatura-humedad. Según a la modificación al sistema de clasificación climática de *Köppen*: **Am:** tropical monzónico, **Aw:** tropical sabana, **BSh:** seco estepario cálido, **Cfa:** templado subtropical húmedo, **Cfb:** templado oceánico, **Csa:** templado mediterráneo, **Csb:** templado mediterráneo de veranos frescos, **Cwa:** templado subtropical con invierno seco y **Dfb:** continental de verano fresco.

2.3 Estimación de parámetros genéticos.

La estimación de parámetros genéticos es necesario para determinar el grado de variación de un carácter que es debido a la genética y también para predecir asociaciones genéticas y fenotípicas entre dos o más variables. Estos parámetros son comúnmente requeridos para construir índices de selección y predecir respuestas correlacionadas y principalmente para realizar evaluaciones genéticas más eficientes (Rincón et al., 2015).

La estimación de heredabilidad y correlaciones genéticas son importantes, puesto que determinan la cantidad de la variación total encontrada en una característica que es atribuida al efecto directo de los genes (variación genética aditiva) (Pérez M., 2017), en la tabla 3 se muestran las heredabilidades y las repetibilidades en ganado lechero Holstein y Suizo Pardo que han dado a conocer diversos autores.

Tabla 3. Heredabilidades y repetibilidades reportadas por diversos autores en ganado lechero Holstein y Suizo Pardo con una producción ajustada a 305 días.

Autores	Año	País	Raza	Lactación	h ²	re
Meseret y Negussie	2017	Etiopia	HO	1	0.20 - 0.26	-
Meseret y Negussie	2017	Etiopia	HO	2	0.15 - 0.27	-
Meseret y Negussie	2017	Etiopia	HO	3	0.17 - 0.28	-
Şahin et al.	2014	Turquía	SP	1	0.25	-
Toledo et al.	2014	México	HO	1	0.23 -0.35	-
Toledo et al.	2014	México	HO	1-5	0.34 - 0.41	0.39 - 0.41
Ríos et al.	2012	México	HO y SP	-	0.28	0.40
Tilki et al.	2009	Turquía	SP	1	0.23	-
Tilki et al.	2009	Turquía	SP	1-7	0.19	-
Pérez y Gómez	2005	Venezuela	SP	1->=7	0.13	0.42
Bakir et al.	2004	Turquía	SP	-	0.37	0.54
Bakir et al.	2004	Turquía	HO	-	0.21	0.36
Rennó et al.	2002	Brasil	SP	-	0.37	0.40

h²= heredabilidad, re= repetibilidad, SP= Suizo Pardo, HO= Holstein

2.4 Métodos estadísticos usados para la evaluación genética de la producción de leche en ganado lechero bajo estrés calórico.

El modelo animal se puede ver como una familia de diferentes modelos estadísticos utilizados para la predicción del mérito genético de los animales en una población, estimación del progreso genético y de componentes de varianza que varían según la estructura de los datos y de los efectos genéticos considerados para un carácter cuantitativo, se expresa mediante un modelo mixto considerando efectos fijos y aleatorios, donde el efecto fijo suele ser el efecto atribuible a un conjunto finito de niveles de un factor que interviene en la expresión de los caracteres de importancia (sexo, época del año, edad, número de parto, entre otros) y el efecto aleatorio generalmente se refiere al animal como un conjunto infinito de niveles que incluye factores genéticos (efecto genético aditivo directo, materno, entre otros) y de ambiente permanente y temporal (Martínez et al., 2012 y Caballero, 2017).

Al momento de tomar datos repetidos a través del tiempo para varios individuos, se tiene una estructura de datos longitudinales; para este tipo de datos se utilizan frecuentemente modelos de repetibilidad, modelos de múltiples características y modelos de regresión aleatoria. El modelo de repetibilidad fue la primera aproximación para la evaluación genética de mediciones tomadas a través del tiempo en los individuos, generalmente asume una correlación genética de unidad, igual varianza y correlación ambiental entre todos los pares de registros; hecho que no siempre se cumple en la práctica. Un mejoramiento del modelo de repetibilidad es el modelo de múltiples características, sin embargo, se ajusta a una estructura de covarianzas discontinua siendo esta realmente continua y la matriz de covarianzas es no estructurada (*Mrode, 2005 y Martínez et al., 2012*).

Un modelo apropiado para el análisis de mediciones repetidas durante el tiempo o la edad debe tener en cuenta la estructura de covarianzas que cambia con el tiempo, éste es el caso del modelo de regresión aleatoria, dicho concepto fue implementado por Schaeffer y Dekkers en 1994 para el análisis de registros de días de prueba en ganado lechero. El modelo de regresión aleatoria utiliza coeficientes de regresión asociados a cada uno de los individuos, dado que el individuo es tratado como efecto aleatorio, los coeficientes asociados también son tratados como efectos aleatorios; a diferencia de los modelos que emplean coeficientes de regresión fija, los cuales son comunes para todos los individuos de la población. Una de las ventajas del modelo de regresión aleatoria es predecir la evolución completa de una trayectoria de crecimiento o curva de lactancia, por lo que permite analizar patrones de variación genética en la trayectoria (*Misztal y Ravagnolo, 2002; Mrode, 2005; Aguilar et al., 2009 y Martínez et al., 2012*).

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los productores buscan la rentabilidad de su hato lechero bajo condiciones de estrés calórico, ya que sus vacas reflejan una producción de leche baja durante la lactancia en épocas donde las temperaturas sobrepasan al confort térmico. Por lo tanto, esta propuesta requiere de la evaluación de parámetros genéticos para la producción láctea que pueden estar intrínsecos en la raza Suizo Pardo a la resistencia de estrés calórico, en los ranchos del estado de Yucatán donde la temperatura promedio anual es de 26 °C, la humedad relativa promedio en los meses de noviembre-abril y mayo-octubre es de 78 y 80, respectivamente y presenta un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano.

JUSTIFICACIÓN

En México no se han hecho trabajos de estimación de parámetros genéticos en ganado Suizo Pardo productor de leche bajo estrés calórico, por lo que surge la necesidad de conocer esta información y ver si esta población es candidata a un programa de mejoramiento genético, que nos ayudaría posteriormente a seleccionar las mejores vacas productoras bajo condiciones ambientales adversas y así mejorar el progreso genético a través de las generaciones y crear en un futuro próximo una línea genética de ganado resistente al estrés calórico.

OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS DEL PROYECTO

Objetivo General

Estimar los parámetros genéticos asociados a la producción láctea en vacas Suizo Pardo bajo estrés calórico en la comunidad de Puerto Progreso, Mérida, Yucatán.

Objetivos específicos

1. Calcular el índice de temperatura y humedad en vacas lecheras en producción para poder identificar aquellas que se encuentren en estrés calórico.
2. Obtener los componentes de (co)varianza para la población de vacas lecheras Suizo Pardo en Yucatán utilizando un modelo lineal mixto de regresión aleatoria, utilizando la metodología del mejor predictor lineal insesgado (BLUP).
3. Estimar las heredabilidades y repetibilidades para la producción láctea en las vacas lecheras en lactación bajo las condiciones de estrés calórico utilizando un modelo lineal mixto de regresión aleatoria, utilizando la metodología del mejor predictor lineal insesgado (BLUP).
4. Calcular las correlaciones genéticas y fenotípicas entre producción de leche, la frecuencia respiratoria y la temperatura rectal.

HIPÓTESIS

La población de vacas del rancho San Pedro en la comunidad de Puerto Progreso, Mérida, Yucatán, presentará un incremento en el ITH mayor a 70, con una heredabilidad por arriba de 0.15 y correlaciones genéticas y fenotípicas negativas significativas entre las variables productivas y fisiológicas, lo que indicará que la población se encontrará en estrés calórico con mediana afectación en la producción de leche, frecuencia respiratoria y temperatura rectal.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de estudio.

El estudio se llevó a cabo en el Rancho San Pedro, en la comunidad de Puerto Progreso, Mérida, Yucatán; con las siguientes coordenadas: 21°17'13.8"N 89°38'14.9"W. Presenta un clima seco estepario muy cálido con lluvias en verano, según a la clasificación de Köppen se define como BSh' (García, 2004), con una temperatura promedio anual de 26.2 °C, precipitación anual de 529.6 ml y humedad relativa promedio de 78 y 80 en los meses de noviembre-abril y mayo-octubre, respectivamente (INEGI, 2021).

3.2 Animales y condiciones de manejo.

Se utilizaron 170 vacas multíparas Suizo Pardo (del primer al noveno parto) hijas de 33 padres y 125 vacas. Los animales estuvieron en un sistema estabulado con una frecuencia de ordeña de dos veces al día (7:00 a.m. y 6 p.m.), recibieron una dieta que constaba de zacate Maralfalfa (*Penisetum sp.*) y de un concentrado comercial ofrecido al entrar a la ordeña. El periodo de muestreo comprendió del 21 de octubre del 2019 al 17 de diciembre del 2020 durante la segunda ordeña del día, a las vacas en producción se le muestreó cada tercer día la temperatura: rectal, corporal y ambiental, así como la frecuencia respiratoria; para conocer el nivel de estrés calórico que presentaba la población se calculó el ITH con los registros de la temperatura ambiental y la humedad relativa correspondientes al día de muestreo. A mediados de cada mes se registró la producción de leche por día/vaca, la cual posteriormente se ajustó a 305 días con una regresión simple.

Se realizó un pedigree maestro incluyendo nueve generaciones de todos los ancestros de los individuos muestreados, conformando un archivo de 1735 individuos, con 125 padres y 462 madres; posteriormente se metió al programa de pedigree Viewer (Kinghorn, 2022) para una remuneración la cual finalmente se ocupó para obtener el pedigree de los individuos muestreados, con 33 padres y 125 madres, de las cuales unas tuvieron más de un parto quedando 170 individuos.

3.3 Captura de datos.

El registro de los datos se llevó en libretas de campo, base de datos de Excel y Access, para la conservación de la información y su análisis. De las variables muestreadas se obtuvo el siguiente número de datos: 10293 para la temperatura rectal, 10321 para la frecuencia respiratoria, 8397 para la temperatura de cámara termográfica, 9600 para la temperatura infrarroja, 10354 para la temperatura ambiental y 10354 para la humedad relativa; obtenidos de 501 individuos, de los cuales se depuraron los que no contaban con su primer parto y no tenían registros productivos del 2018 al 2021. Posteriormente se eliminaron aquellos registros que estuvieran fuera de tres desviaciones estándar de la media, quedando un total de 170 individuos con 8838, 8700, 7085, 8184, 8840, 8840 observaciones para temperatura rectal, frecuencia respiratoria, temperatura de cámara termográfica, temperatura infrarroja, temperatura ambiental y humedad relativa, respectivamente.

3.4 Obtención de las variables productivas, fisiológicas y ambientales.

Producción de leche ajustada a 305 días: Para obtener la producción de leche ajustada a 305 días se utilizó un factor de ajuste contemplando el número y época de parto y días en leche a través de una regresión lineal múltiple(f1). Finalmente, para obtener la producción de leche ajustada a 305 días, se dividió la producción corregida entre los días en leche y multiplicado por 305 (f2). Las fórmulas utilizadas fueron las siguientes (López, 2015).

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \quad \text{f1}$$

Donde:

\hat{Y} = será la producción de leche total corregida (kg)

X_1 = número de parto

X_2 = época de parto

X_3 = días en leche

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ y β_3 = son coeficientes de corrección.

$$PLT_{305} = \left(\frac{PLT \text{ Ajustada}}{DEP} \right) \times 305 \quad \text{f2}$$

Donde:

PLT305= producción de leche total a 305 días.

PLT Ajustada= producción de leche total corregida

DEP= días en producción

Temperatura rectal: La temperatura rectal se registró individualmente con la ayuda de un termómetro digital, este se introdujo con una inclinación de 45 °C pegado a las paredes del recto para evitar tomar temperatura cecal, se dejó hasta que sonara el termómetro y se procedió a retirarlo para hacer la lectura correspondiente.

Temperatura corporal: La temperatura corporal se tomó individualmente con ayuda de una cámara termográfica modelo FLIR E4 9 HZ para obtener imágenes dinámicas, previamente se calibró y se procedió a tomar la captura de imagen con una visibilidad del lado izquierdo del animal. Se complementó con un termómetro infrarrojo, posicionándolo a una distancia de 15 centímetros del área asignada y enseguida se presionó el botón para captar la temperatura. En la figura 1 se muestran las imágenes de la toma de temperatura de cámara termográfica en una vaca en ordeño (A) e instalaciones (B); la temperatura observada del lado superior izquierdo es referente a

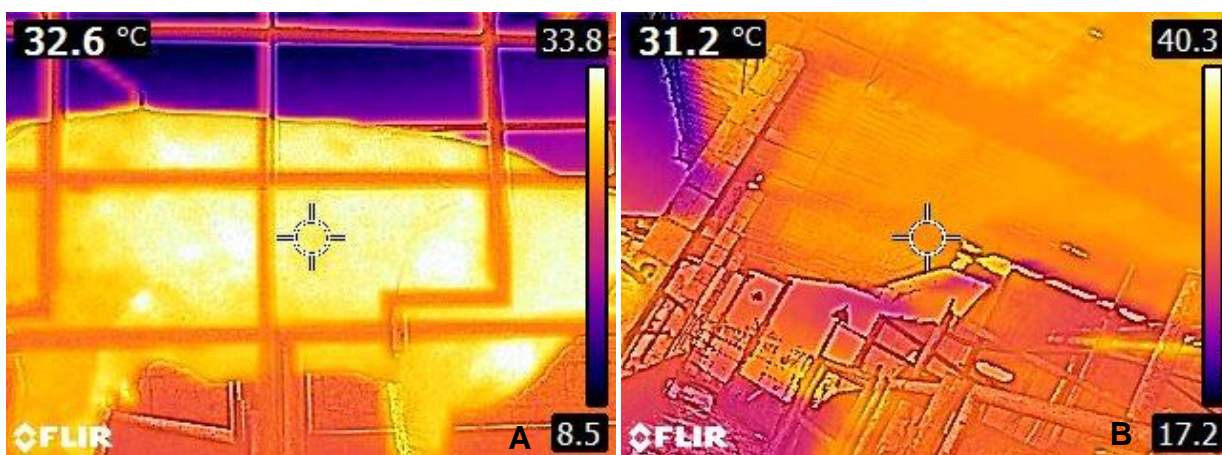


Fig. 1 A temperatura de una vaca durante la ordeña, B instalaciones del rancho San Pedro.

la del puntero, mientras que el rango de la temperatura en toda la toma está del lado derecho con una escala de colores donde una tonalidad negra corresponde a la temperatura mínima y al otro extremo de color blanco es la temperatura máxima captada.

Frecuencia respiratoria: La frecuencia respiratoria se inspeccionó con ayuda de un cronometro. Visualmente se vieron los movimientos costo-abdominales del flanco izquierdo del animal y simultáneamente se contabilizó por 15 segundos con el cronometro en mano, posteriormente se multiplicó por cuatro para obtener la frecuencia respiratoria por minuto.

Temperatura ambiental y humedad relativa: La temperatura ambiental y humedad relativa se obtuvieron con ayuda de un termohigrómetro digital a una altura aproximada de 1.5 m de altura del suelo en las instalaciones del rancho, durante el horario de ordeña de la tarde, con un sensor se obtuvieron las mediciones en donde se encontraban los animales, lo anterior se complementó con los registros proporcionados por la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) de la estación meteorológica “progreso” ubicada en las siguientes coordenadas 21°16'55"N 89°39'45"W.

Índice de Temperatura-Humedad: El ITH se calculó con ayuda de la fórmula usada por *Carabaño et al.*, (2016):

$$THI = (1.8 \times T_{db} + 32) - [(0.55 - 0.0055 \times RH) \times (1.8 \times T_{db} - 26)] \quad \mathbf{f3}$$

Dónde: T_{db} es la temperatura ambiental del bulbo seco expresada en grados Celsius, por lo que el termino $(1.8 \times T_{db} + 32)$, representa la conversión de los datos de temperatura en grados Fahrenheit (el agua se congela a 0 °C (32 °F) y hierve a 100 °C (212 °F), lo que indica una diferencia de 100° en °C (180° en °F), por lo tanto, en cada grado en la escala Celsius es igual a 180/100 o 9/5 grados (1.8) en la escala Fahrenheit); HR es la humedad relativa expresada en porcentaje, 26 es una constante

que se refiere a la relación que hay de acuerdo al lugar o ubicación donde una temperatura de 26 °C promedio se relaciona con una Humedad de 70 a 80 %.

3.5 Análisis estadístico.

Para el procesamiento, edición y gráficos de los datos se utilizó el programa de R versión 4.1.2 (*R Core Team, 2021*) con las siguientes paqueterías: *psych* (*Revelle, 2021*), *dplyr* (*Wickham et al., 2021*), *lubridate* (*Grolemund y Wickham 2011*), *orthopolynom* (*Novomestky, 2022*) y *ggplot2* (*Wickham, 2016*). Para las estimaciones de los componentes de varianza se aplicó un modelo animal de regresión aleatoria univariado y para las correlaciones genéticas entre las características se obtuvieron mediante un modelo animal bivariado empleando los mismos efectos fijos y aleatorios incluidos en el análisis univariado. Los componentes de varianza y covarianza se calcularon mediante el software BLUPF90 utilizando el logaritmo de máxima verosimilitud restringida (REML), de la Universidad de Georgia, Estados Unidos de América (*Misztal et al., y Masuda, 2018*). El modelo animal de regresión aleatoria expresado en su fórmula matricial es:

$$y = Xb + Qu + Zpe + e \quad \mathbf{f4}$$

donde:

y: vector (número de registros x 1) de observaciones de producción de leche ajustada a 305 días;

X: matriz de incidencia de efectos fijos (número de registros x número de niveles para efecto fijo), donde se incluyó la interacción del efecto estación-día de prueba (ED), interacción del efecto número-año-estación de parto (AEP), días en leche categorizado (DELC), índice temperatura-humedad (ITH) y la temperatura rectal (TR) y como covariables se utilizaron los coeficientes de los polinomios de Legendre orden cuatro.

b: vector (número de niveles para efecto fijo x 1) de efectos fijos;

Q: matriz covariable de efectos aleatorios (número de registros x número de niveles para efecto aleatorio), que incluye el efecto del animal con los coeficientes de los polinomios de Legendre orden cuatro.

u : vector (número de niveles para efecto de regresión aleatoria x 1) de los coeficientes de regresión aleatoria para el efecto genético aditivo del animal.

Z: matriz covariable de efectos aleatorios (número de registros x número de niveles para efecto aleatorio), que incluye el efecto del ambiente permanente con los coeficientes de los polinomios de Legendre orden cuatro.

pe : vector (número de niveles para efecto de regresión aleatoria x 1) de los coeficientes de regresión aleatoria para el efecto del ambiente permanente.

e : vector (número de registros x 1) aleatorio (error).

A continuación, se detalla el modelo animal de regresión aleatoria utilizado para obtener los componentes de varianzas de la población del rancho San Pedro.

$$y_{ijklnopq} = ED_i + AEP_j + DELC_k + ITH_l + TR_n + \sum_{m=0}^4 \phi_{spm} \beta_{sm} + \sum_{r=0}^4 \phi_{opm} u_{om} + \sum_{m=0}^4 \phi_{opm} pe_{om} + e_{ijklnopq}$$

f5

Donde: $y_{ijklnopq}$ es la producción de leche ajustada a 305 días q de la vaca o dentro de la estación-día de prueba i , clase j del número-año-estación de parto, clase k de DEL categorizado, clase l de ITH, clase n de temperatura rectal; ED_i = efecto fijo de la estación-día de prueba i , AEP_j = efecto fijo del número-año-estación de parto j , $DELC_k$ = efecto fijo de días en producción de leche categorizado k , ITH_l = efecto fijo del índice temperatura-humedad l , TR_n = efecto fijo de temperatura rectal n ; β_{sm} = son los coeficientes de regresión fija sobre DEL para la s^{th} estación de parto, u_{om} y pe_{om} = son los efectos de la regresión aleatoria para la genética aditiva y el ambiente permanente para la vaca o^{th} , respectivamente; ϕ_{spm} = son los coeficientes m^{th} de los polinomios de Legendre de la regresión fija de orden cuatro, ϕ_{opm} = son los coeficientes del polinomio de Legendre de la regresión aleatoria de orden cuatro y $e_{ijklnopq}$ = es el efecto residual aleatorio asociado con $y_{ijklnopq}$. Las estaciones comprendieron cuatro niveles: primavera (21 de marzo - 21 de junio), verano (22 de junio - 21 de septiembre),

otoño (22 de septiembre - 21 de diciembre) e invierno (22 de diciembre - 20 de marzo); el número de parto fue del primer al noveno parto, incluyendo en la última categoría los partos mayores e iguales a cinco lactancias (5 niveles), el año de parto fue del 2018-2020 (3 niveles), los DELC se formaron a través de un rango de 30 días por cada categoría (16 niveles) el último nivel fue mayor a 451 días en producción, el ITH fue continuo tomando la unidad (24 niveles), la temperatura rectal se tomó por cada 0.1° (41 niveles).

La heredabilidad en sentido estricto (f4) y la repetibilidad (f5) para la producción de leche ajustada a 305 días con los diferentes coeficientes de regresión aleatoria del polinomio de Legendre grado 4 fueron obtenidas con las siguientes formulas:

$$h^2 = \frac{\sigma_a^2}{\sigma_p^2} \quad f6$$

$$re = \frac{\sigma_a^2 + \sigma_{pe}^2}{\sigma_p^2} \quad f7$$

$$\sigma_p^2 = \sigma_a^2 + \sigma_{pe}^2 + \sigma_e^2 \quad f8$$

donde:

σ_p^2 =Varianza fenotípica

σ_a^2 = Varianza aditiva

σ_{pe}^2 = Varianza de ambiente permanente

σ_e^2 = Varianza del error

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Variables productivas, fisiológicas y ambientales.

En la tabla 4 se observan los estadísticos descriptivos de las variables productivas, fisiológicas y ambientales de la población muestreada (del primer parto al quinto y más partos) en el periodo octubre 2019 – diciembre 2020, para la producción de leche diaria, producción de leche total ajustada a 305 días, los días en producción de leche, temperatura infrarroja, temperatura de cámara termográfica, frecuencia respiratoria, temperatura rectal, temperatura ambiental, humedad relativa y el índice temperatura-humedad.

Tabla 4. Promedios, desviaciones estándar, mínimos y máximos de las variables productivas, fisiológicas y ambientales en la población de vacas Suizo Pardo del rancho San Pedro, tomadas en el periodo octubre 2019 – diciembre 2020.

Vacas	Parámetro	N	Promedio	Mínimo	Máximo
VARIABLES PRODUCTIVAS:					
170	PL (kg)	8840	16.30 ± 4.84	5	36
	PLT (kg)	8840	5027.23 ± 244.67	3393	6435
	DEL	8840	355.05 ± 81.72	53	505
VARIABLES FISIOLÓGICAS:					
170	TI (°C)	8184	32.03 ± 1.88	24.9	37.8
	CTG (°C)	7085	34.66 ± 1.76	27.8	39.8
	FR (rpm)	8700	47.16 ± 12.91	24	88
	TR (°C)	8838	37.55 ± 0.72	36	39.9
VARIABLES AMBIENTALES:					
170	TA (°C)	8840	28.43 ± 4.13	17.6	39.63
	HR (%)	8840	73.89 ± 10.04	36.92	100
	ITH	8840	79.35 ± 5.48	63	88

N: número de observaciones, **PL:** producción de leche diaria, **PLT:** producción de leche total ajustada a 305 días, **DEL:** días en producción de leche, **TI:** temperatura infrarroja, **CTG:** temperatura de la cámara termográfica, **FR (rpm):** frecuencia respiratoria por minuto, **TR:** temperatura rectal, **TA:** temperatura ambiental, **HR:** humedad relativa, **ITH:** índice temperatura-humedad.

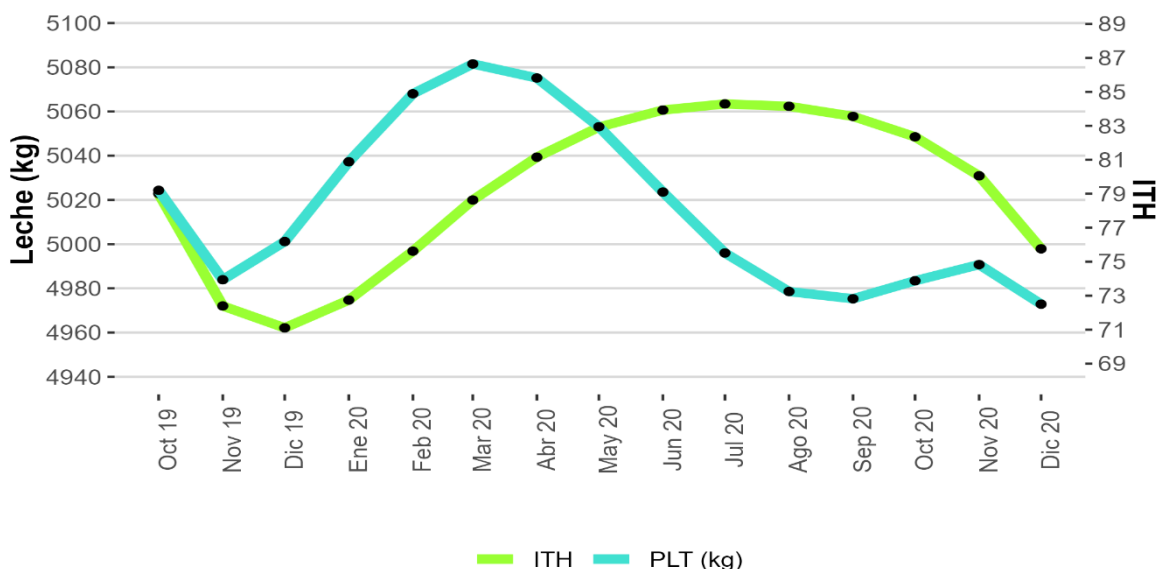
4.1.1. Variables productivas

La PL promedio fue de 16.30 ± 4.84 kg, ésta fue alta a comparación de lo reportado en ganado Suizo Pardo en Panamá por *Araúz et al. (2010)*, *Lucena (2014)* en Venezuela, 15.46 y 12.26 kg., respectivamente, y *Ríos et al. (2012)* en Hueytamalco, Puebla, con ganado Suizo Pardo y Holstein (11.0 ± 2.3); al mismo tiempo está por debajo ($23.29 - 27.51$ kg) a lo encontrado en vacas italianas Suizo Pardo por *Maggiolino et al. (2020)* y *Landi et al. (2023)*, mientras que, *Mylostyvyi et al. (2021)* observó una producción láctea diaria de 27.3 ± 0.22 kg durante el verano en Ucrania.

La cantidad de litros de leche mínima registrada fue de 5 kg, esto se debió a que fueron vacas que estaban finalizando su lactación y próximas a la etapa de secado, *Ríos et al. (2012)*, *Maggiolino et al. (2020)* y *Landi et al. (2023)* reportan la misma producción mínima de leche en sus estudios. Por otra parte, la PLT promedio fue de 5027.23 ± 244.67 kg, la cual es mayor a lo reportado en ganado Holstein y Suizo Pardo por *Ríos et al. (2012)* y está por debajo a lo encontrado en Suizo Pardo brasileño por *Rennó et al. (2022)* en dos ordeñas (5267.68 ± 1982.81 kg) en el mismo estudio tuvieron vacas que ordeñaban 3 veces al día con una producción láctea de $6491.37 - 2092.46$ kg. Los DEL promedio fueron de 355.05 ± 81.72 días, similar a lo reportado por *Ríos et al. (2012)* en Hueytamalco, Puebla, México con un clima subtropical húmedo semicálido.

En el gráfico 2 se muestran el comportamiento de la producción de leche ajustada a 305 días y del ITH a través de los días transcurridos, los puntos graficados corresponden a una categoría de los días en leche.

Gráf. 2 Comportamiento de la producción de leche ajustada a 305 días e ITH durante los meses de muestreo.



La PLT en los primeros 120 días después del primer mes de muestreo la producción láctea va en aumento, semejando la curva de lactancia donde alcanza el pico en el primer tercio de la lactación, a pesar de estar con un ITH mayor a 72 en la mayoría de los meses, éste no influyó sobre la producción de leche alcanzada a los 305 días, lo precedente se reafirma con el comportamiento similar de la producción de leche diaria (ver gráfico 3), lo que nos da indicios de la adaptación de la raza Suizo Pardo en este microclima que ha hecho que la producción láctea no se vea mermada ante cambios ambientales (*Espinoza et al., 2011* y *Carabaño et al., 2016*).

4.1.2. Variables fisiológicas.

La TI promedio fue de 32.03 ± 1.88 °C, ésta fue mayor a lo encontrado por *Regino y Rodríguez (2019)* en ganado Criollo Blanco Orejinegro (BON) colombiano donde realizó muestreos matutinos y vespertinos (27.1 ± 7.2 y 29.4 ± 6.8 , respectivamente), por contraparte, estuvo por debajo de lo que obtuvo *Barragán et al. (2015)* en Colombia con un cruce $\frac{1}{2}$ Romosinuano, $\frac{1}{4}$ Holstein y $\frac{1}{4}$ Cebú comercial (36.39 °C). La temperatura de CTG promedio fue de 34.66 ± 1.76 °C, la cual es mayor a lo reportado por *Cardoso et al. (2015)* en Brasil con seis razas cebuinas durante la

tarde oscilando $31.05\text{ }^{\circ}\text{C}$, *Montanholi et al. (2008)* en Holstein canadienses (33.79 ± 0.29) y *Deak et al. (2019)* en Holstein brasileñas durante la época seca de abril a septiembre ($33.3 \pm 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$) y lluviosa de octubre a marzo ($34.2 \pm 1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$), caso contrario fue observado en vacas Holstein brasileñas por *Lodi et al. (2014)* ($35.15 \pm 0.65\text{ }^{\circ}\text{C}$), en ganado Suizo Pardo brasileño por *Silva et al. (2017)* ($36.0 \pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$) y en Vietnam por *Bang et al. (2022)* con cruza entre Holstein, Cebú, Jersey y Suizo Pardo ($36.7\text{ }^{\circ}\text{C}$).

En cambio la TR promedio fue de $37.55 \pm 0.72\text{ }^{\circ}\text{C}$ la cual fue menor a lo que obtuvo *Araúz et al. (2010)* en Panamá en ganado Suizo Pardo y Holstein (39.68 y $40.06\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente), *Silva et al. (2017)* en vacas brasileñas Suizo Pardo ($39.1 \pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$) y *Mylostyvyi et al. (2021)* en el verano de Ucrania ($38.4 \pm 0.58\text{ }^{\circ}\text{C}$), en contraparte, en Uruguay, *Saravia (2009)* contabilizó la TR en ganado Holstein y Jersey al sol obteniendo $40.0 \pm 0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $39.5 \pm 0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente, en el orden dado del mismo experimento bajo la sombra disminuyó 0.5 y $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. La FR promedio fue de $47.16 \pm 12.91\text{ rpm}$, ésta fue inferior a lo reportado por *Saravia (2009)*, en su experimento compararon ganado Jersey y Holstein bajo la exposición del sol y en la sombra, al exponerse al sol incremento en ambas razas $72.0 \pm 1.64\text{ rpm}$ y $71.8 \pm 1.64\text{ rpm}$, por contraparte, en la sombra disminuyó a $52.3 \pm 1.64\text{ rpm}$ y $58.8 \pm 1.64\text{ rpm}$ tanto para Holstein y Jersey, respectivamente; *Mylostyvyi et al. (2021)* también reportó $62.3 \pm 10.54\text{ rpm}$ durante el verano de Ucrania.

4.1.3. Variables ambientales.

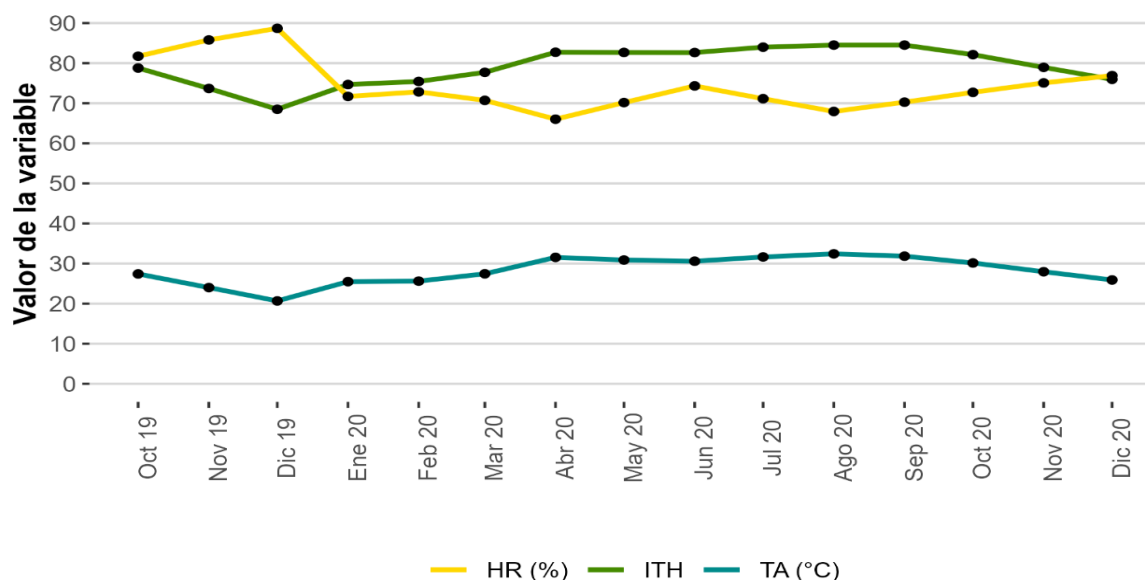
La TA promedio registrada fue de $28.43 \pm 4.13\text{ }^{\circ}\text{C}$, *Hernández et al. (2007)* en la costa de Veracruz, México obtuvo valores menores de $23.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para época seca y de lluvias, respectivamente. Por otra parte, estuvo por debajo a lo reportado por *Barragán et al. (2015)* en Colombia ($29.80\text{ }^{\circ}\text{C}$), *Mylostyvyi et al. (2021)* con una temperatura de $30.6 \pm 0.49\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el verano de Ucrania, mientras que, *Silva et al. (2017)* en Brasil alcanzó los $36.5 \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a la sombra y $40.3 \pm 0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el sol. La temperatura máxima se registró el 23 de abril del 2020 con una HR de 36.92% dando

un ITH de 88 afectando el aumento de la FR (55.89 ± 12.33 rpm), la TR se mantuvo en 38.06 ± 0.75 °C (*Hernández et al., 2007; Espinoza et al., 2011 y Cerqueira et al., 2016*); caso contrario, la temperatura mínima se obtuvo el 05 de diciembre de 2019 con una HR de 90 obteniendo un ITH de 63, esto dio valores menores en la FR (46.46 ± 8.72 rpm) y TR (37.63 ± 0.53 °C) (*Hernández et al., 2007; Regino y Rodríguez, 2019 y Espinoza et al., 2011*).

La temperatura obtenida en las instalaciones del rancho rebasa la zona de confort (<26 °C) para la producción de leche en ganado lechero (*Dikmen y Hansent, 2009 y Espinoza et al., 2011*). La HR promedio estuvo en 73.89 ± 10.04 %, la cual está por debajo a lo descrito por Hernández et al., 2007 en la costa de Veracruz, México (81.3 %) y al mismo tiempo fue mayor de lo reportado por *Mylostyvyi et al. (2021)* en Ucrania (39.6 ± 3.99 %) y *Barragán et al. (2015)* en Colombia (63.51 %). *Silva et al. (2017)* en Brasil encontró una HR de 25.3 ± 2.1 expuesto al sol y en la sombra de 31.5 ± 1.7 . La HR máxima se recabo el 02 de junio de 2020, dicho valor fue complementado con la base de datos de CONAGUA, con una TA de 23.24 °C interactuando con un ITH de 74 y a la vez una FR de 39.36 ± 7.35 rpm y una TR de 37.11 ± 0.73 °C. La HR mínima fue con el mismo registro de la TA máxima.

Durante todo el periodo de muestreo el ITH fue mayor a 78 que superó los límites establecidos para el inicio del estrés calórico en bovino lechero (<72) (*Hernández et al., 2011 y Cerqueira et al., 2016*). En las fechas 23 de abril y 09 de junio de 2020, se capturo el ITH máximo (con 38.01 ± 1.59 °C y 46.61 ± 9.5 % de TA y HR, respectivamente) variando en la FR (56.82 ± 11.73 rpm) y TR (37.91 ± 0.69 °C) registradas, lo anterior es similar a lo encontrado por *Leyva et al. (2015), Enríquez y Álvarez (2020) y Mylostyvyi et al. (2021)*. El ITH mínimo calculado de la interacción de una TA de 17.77 ± 0.07 °C y una HR de 66.94 ± 9.59 % se registró en las siguientes fechas: 05 de diciembre de 2019 y 27 de febrero de 2020 con una FR de 36.36 ± 7.73 rpm y una TR de 37.30 ± 0.70 °C, este índice es similar a lo encontrado por *Espinoza et al. (2011), Cerqueira et al. y Yadav et al. (2016)*. En la gráfica 3 se

Gráf. 3 Comportamiento de las variables ambientales y del ITH durante los meses de muestreo.

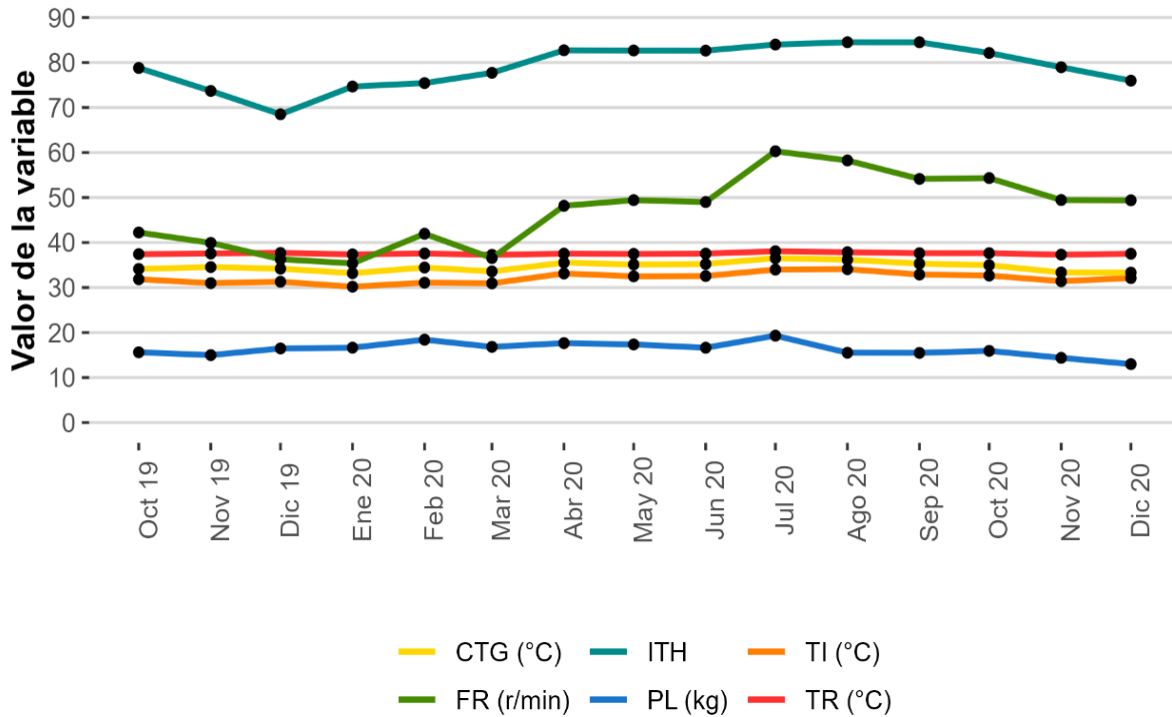


visualiza la variación de la temperatura ambiental, la humedad relativa y la interacción de ambas a través del ITH durante los diferentes meses de muestreo.

Durante todos los meses de muestreo las vacas estuvieron en estrés calórico >72 , mientras que en diciembre 2019 se mantuvo sin estrés calórico <72 . La TA sigue el mismo patrón del ITH y está mayormente influenciado por la misma a comparación de la HR, ésta última tiene una alta correlación negativa con la TA (-0.95) lo que indica que cuando se presentan un aumento en la temperatura hay una disminución sobre la humedad relativa y viceversa, esta correlación negativa es similar a lo encontrado por *Dikmen y Hansent (2009)*. En los meses de julio a septiembre tanto la TA como el ITH aumentan dando un indicio que son los meses con mayor estrés calórico debido a las altas temperaturas presentadas con una HR promedio de 70 %, durante estos mismos meses *Espinoza et al. (2011)* en el municipio de la paz, baja california, *Leyva et al. (2015)* en el valle del Yaqui, Sonora, *Enríquez y Álvarez (2020)* en Cuba y *Mylostyvyi et al. (2021)* en el verano de Ucrania encontraron el mismo comportamiento del ITH. *Hernández et al. (2011)* realizó un recuento de las temperaturas ambientales promedios registradas en la costa de Veracruz, México desde 1917 hasta 2008, indicando que los meses con temperaturas más altas abarca de mayo a septiembre (>26 °C) con una HR alrededor del 80 % y al mismo tiempo el ITH ronda por 76 unidades.

En el gráfico 4 se visualiza el comportamiento de las variables fisiológicas (TI, CTG y TR), la producción de leche diaria y el ITH a través del periodo transcurrido de muestreo (octubre 2019 - diciembre 2020)

Gráf. 4 Comportamiento de las variables fisiológicas, producción de leche y del ITH durante los meses de muestreo.



Las temperaturas de TI y CTG siguen el mismo patrón de comportamiento a la par de los aumentos en la FR a diferencia de la TR, conforme transcurren los meses. El resultado de la TR promedio no tuvo gran variación durante los diferentes meses evaluados (37.27 – 38.07 °C), lo anterior da una respuesta favorable a la adaptación mejorada de la raza a este clima concordando con una regulación más eficiente de la temperatura corporal (Hansen, 2004; Espinoza et al., 2011 y Carabaño, 2016). Caso contrario con la respuesta de la FR la cuál en enero fue más baja de 35.36 ± 10.85 rpm y en julio la más alta (60.29 ± 15.44 rpm) ésta última es similar a lo encontrado en ganado Holstein y Suizo Pardo por Mylostyvyi et al. (2021) en Ucrania; los picos más evidentes de la FR son similares a la PL durante los meses de febrero y julio, 18.4 y 19.3 kg, respectivamente, éste último mes tiene un comportamiento singular entre ambas variables dando pauta a un incremento durante el inicio del verano, donde los

animales están expuestos a una TA >30 °C, oscilando en 70 % de HR y con un ITH >80, sin embargo con los mismos parámetros durante los dos siguientes meses, la FR disminuye gradualmente al igual que la PL posteriormente se mantiene en los siguientes meses de verano.

Maggiolino et al., (2020), reporto en ganado Suizo Pardo italiano en diferentes lactancias (1 a ≥4 partos) que la producción de leche diaria comparada en las diferentes unidades del incremento del ITH (50 a 90) no hubo variación sobre esta, sugiriendo que puede deberse a que las razas han desarrollado mecanismos de autorregulación a las condiciones adversas y presentar una resistencia al estrés calórico, anteponiendo la cantidad de litros producidos en esta población (16.30 kg) (*Boonkum et al., 2011*) la cuál es menor a comparación de la raza Holstein demostrando que es más susceptible al estrés calórico (*Bernabucci et al., 2014; Mylostyvyi et al., 2021*). Al comparar los meses que cuentan con ambos años de muestreo (2019 y 2020), el ITH del 2020 para los meses de octubre a diciembre repercutió en un aumento de este a comparación del año anterior, esto influenciado por la temperatura ambiental que tiene una alta correlación positiva (0.98) con el ITH (*Dikmen y Hansent, 2009*) siendo el año más caluroso en Progreso reportado hasta la fecha por el *INEGI (2021)* (ver Gráf.1 y 3 y Fig. 2).

4.2 Clasificación del ITH.

En la tabla 5 se muestra la interacción de los mínimos y máximos de la TA y la HR registradas en las instalaciones del rancho San Pedro y complementadas con la información de la estación de progreso de la CONAGUA para obtener el cálculo del ITH, este índice es clasificado de acuerdo con *Espinoza et al., Hernández et al. (ambos en el 2011), Cerqueira et al. y Dash et al. (ambos en el 2016)*, en 5 categorías: sin estrés: por debajo de 72, leve: valores entre 72 y 78, moderado: de 79 a 88, grave: valores mayores a 88 a 98 y muerte por golpe de calor: por arriba de 98.

Tabla 5. Clasificación del estrés calórico de acuerdo con el ITH calculado en la población Suizo Pardo del rancho San Pedro.

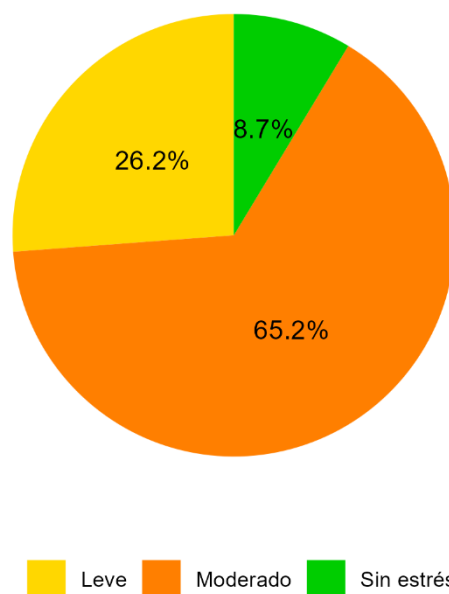
		Temperatura ambiental (°C)																						
		18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Humedad relativa (%)	37	62	63	64	65	66	68	69	70	71	72	73	75	76	77	78	79	81	82	83	84	85	86	88
	40	62	63	64	65	67	68	69	70	71	73	74	75	76	77	79	80	81	82	84	85	86	87	88
	45	62	63	64	66	67	68	69	71	72	73	75	76	77	78	80	81	82	83	85	86	87	88	90
	50	62	63	65	66	67	69	70	71	73	74	75	76	78	79	80	82	83	84	86	87	88	90	91
	55	62	64	65	66	68	69	70	72	73	74	76	77	79	80	81	83	84	85	87	88	89	91	92
	60	62	64	65	67	68	69	71	72	74	75	76	78	79	81	82	83	85	86	88	89	91	92	93
	65	63	64	65	67	68	70	71	73	74	76	77	79	80	81	83	84	86	87	89	90	92	93	95
	70	63	64	66	67	69	70	72	73	75	76	78	79	81	82	84	85	87	88	90	91	93	94	96
	75	63	64	66	68	69	71	72	74	75	77	78	80	82	83	85	86	88	89	91	92	94	96	97
	80	63	65	66	68	69	71	73	74	76	77	79	81	82	84	85	87	89	90	92	93	95	97	98
	85	63	65	67	68	70	71	73	75	76	78	80	81	83	85	86	88	90	91	93	95	96	98	100
	90	63	65	67	68	70	72	74	75	77	79	80	82	84	85	87	89	91	92	94	96	97	99	101
95	64	65	67	69	71	72	74	76	78	79	81	83	85	86	88	90	92	93	95	97	99	100	102	
100	64	65	67	69	71	73	74	76	78	80	82	83	85	87	89	91	92	94	96	98	100	101	103	

Los colores reflejan el grado de estrés térmico, donde el verde representa “sin estrés”, el amarillo “estrés leve”, el naranja “estrés moderado”, el rojo “estrés grave o de emergencia”, el color blanco “muerte por golpe de calor”.

Cuando la TA está por debajo de los 23 °C y en cualquier porcentaje de HR no se presenta estrés calórico, a partir de los 23 °C y variando con la HR empiezan a definirse las categorías con EC, con los mínimos y máximos de TA y HR registrados en el rancho San Pedro se pueden visualizar las siguientes categorías, de menor a mayor se encuentra la categoría de muerte por golpe (2.8 %) con temperaturas por arriba de 38 °C y 85 % de HR, seguida de estrés grave (17.4 %) con temperaturas entre 33 – 40 °C y de 45 a 100 % de HR, enseguida estrés leve (20.5 %) con temperaturas entre 23 – 32 °C y de 37 a 100 % de HR, después sin estrés (29.2 %) con temperaturas menores de 26 °C y HR menores a 100 % y culminando con estrés moderado (30.1 %) con TA de 27 a 40 °C Y HR mayores a 37 %. Lo anterior es una forma práctica para conocer de manera rápida en que categoría se encuentra el ganado cuando se tienen registradas las temperaturas y humedades relativas del medio ambiente. En este estudio se registraron las categorías de sin estrés, leve y

moderado, ésta última predominó durante la mayor parte del estudio. En el siguiente gráfico 5 de pastel, se muestra el porcentaje del número de observaciones dentro de cada categoría del ITH en la población de vacas Suizo Pardo del rancho San Pedro, posteriormente observados en la tabla 6.

Gráf. 5 Porcentaje del número de observaciones dentro de cada categoría del ITH de la población Suizo Pardo.



Durante el periodo de muestreo, donde se incluyeron las cuatro estaciones del año, la población Suizo Pardo estuvo mayormente expuesta a un estrés moderado (65.2 %) seguido de un estrés leve (26.2 %) y una minoría sin estrés (8.7 %), éste último se presentó durante la época de invierno y en otoño 2019 y durante todo el año variaba las categorías de estrés leve y moderado, lo anterior se puede visualizar de mejor manera en el apartado de anexos, donde se incluyen los gráficos de las vacas que se encontraban durante cada época del periodo de muestreo (octubre 2019 - diciembre 2020) con su respectivo número de lactancia. En la tabla 6 se muestran los valores promedio de las variables fisiológicas y ambientales encontrados en las diferentes categorías del ITH de la población de vacas Suizo Pardo.

Tabla 6. Promedios y desviaciones estándar de las variables fisiológicas y ambientales encontradas dentro de cada categoría del ITH en la población de vacas Suizo Pardo.

Vacas	n	%	TR (°C)	FR	TA (°C)	HR (%)
Sin estrés:						
127	765	8.6	37.49 ± 0.57	35.23 ± 7.94	20 ± 1.03	83.08 ± 10.77
Leve:						
170	2315	26.2	37.43 ± 1.06	39.73 ± 12.51	25.19 ± 1.6	79.62 ± 9.39
Moderado:						
170	5760	65.2	37.59 ± 0.88	50.59 ± 13.48	30.85 ± 2.33	70.36 ± 8.19

n: número de observaciones, **%:** porcentaje del número de observaciones, **TR:** temperatura rectal, **FR:** frecuencia respiratoria/min, **TA:** temperatura ambiental, **HR:** humedad relativa.

El 65.2 % del número de observaciones de la población alcanzó un estrés moderado (72 - 88) durante todos los meses del año, específicamente prevaleció en la época de verano y parte de otoño (julio - septiembre) reflejando un incremento en los promedios de los parámetros; seguido del estrés leve (26.2 %) durante la mayoría de los meses a excepción de abril y julio a octubre (2020) y con menor porcentaje la categoría sin estrés (8.6 %) durante los meses de noviembre (después del día 21), diciembre, enero (día 21) y febrero (día 27). A medida que se incrementa el ITH, hay una variación directa en la TA y HR, la primera aumentó 5 °C entre cada categoría mientras que la HR disminuyó en 4 unidades entre la categoría sin estrés y leve, por último, decremento 9 unidades más entre esta última y el estrés moderado. Dentro de las diferencias del aumento entre cada categoría, también afecto notablemente en primera instancia a la FR seguida de la TR, diversos autores demuestran este incremento en cada categoría, como se menciona enseguida. Para la categoría sin estrés la FR encontrada fue de 35.23 ± 7.94 rpm, ésta es mayor a lo encontrado en la costa de Veracruz por *Hernández et al. (2007)* en ganado Criollo lechero (26.38 ± 5.30 rpm) y *Regino y Rodríguez (2019)* en muestreos matutinos y vespertinos (33.6 ± 3.4 y 34.0 ± 3.6 rpm, respectivamente), al mismo tiempo, es menor a lo reportado por *Espinoza et al. (2011)* en Baja California con ganado Jersey, Holstein y Criollo

(41.8 ± 2.3 , 45.3 ± 1.7 y 37.0 ± 0.8 , respectivamente), esta última raza es más cercana a lo obtenido en este estudio, por otra parte la TR fue de 37.49 ± 0.57 °C que es similar a lo obtenido por *Espinoza et al. (2011)* en ganado Jersey, Holstein y Criollo, por otro lado, *Cerqueira et al. (2016)* también obtuvo valores similares, tanto para la FR como para la TR, a los de *Espinoza et al. (2011)* en ganado Holstein, sin embargo, *Hernández et al. (2007)* encontró temperaturas superiores a lo encontrado en Progreso (38.12 ± 0.46 °C).

En otro orden, la FR registrada en la clasificación estrés leve fue de 39.73 ± 12.51 rpm la cual está por debajo a lo reportado por *Hernández et al. (2007)* en ganado Criollo lechero (50.38 ± 7.50 rpm) y por *Espinoza et al. (2011)* en Holstein y Jersey y es mayor que en ganado Criollo (37.0 ± 0.3 rpm), en el mismo artículo la TR se mantiene igual a lo obtenido (37.43 ± 1.06 °C), en contraparte, *Hernández et al. 2007* alcanzo una TR de 39.01 ± 0.56 °C. En la última categoría (>78 <89) la FR alcanzó 50.59 rpm, en esta categoría *Hernández et al. (2007)* recabo una FR de 82.00 ± 12.09 rpm en ganado Criollo lechero al igual que *Espinoza et al. (2011)* encontró el aumento de la misma en ganado Jersey y Holstein por arriba de 60 rpm, estos resultados fueron mayores a lo obtenido en esta clasificación (50.59 ± 13.48 rpm), sin embargo, en el mismo artículo de *Espinoza et al. (2011)* en ganado Criollo fue menor (46.0 ± 0.3 rpm), por otra parte la TR (37.59 ± 0.88 °C) fue menor a lo encontrado en dichas razas ($38.9 - 39.8$ °C). En Portugal *Cerqueira et al. (2016)* obtuvo 80.7 rpm en ganado Holstein con una TR similar a lo reportado por *Espinoza et al. (2011)*. *Yadav et al. (2016)* realizó un experimento en la India con cuatro vacas no lactantes de ganado Vrindavani que es una cruce sintética entre Holstein, Suizo Pardo, Jersey y Haryana (originario del norte de la India) donde expuso a los animales a diferentes temperaturas (25, 30 y 35 °C) con un ITH entre 71 a 84 y al mismo tiempo registró la temperatura del microclima donde se encontraba el animal dando resultados menores en el ITH (57 - 69) con una FR de 27.0 ± 7.4 rpm y una TR de 38.24 ± 0.12 °C, en el mismo experimento al exponerlas a 40 °C obtuvo un ITH de 75 bajo el microclima aumentando la FR a 75.94 rpm y la TR a 39.14 °C. El incremento en la FR favorece la pérdida del exceso de calor para mantener una TR sin variación,

lo que da pauta al desarrollo de mecanismos de autorregulación (Hansen, 2004 y Saravia, 2009). En un estudio realizado por Cardoso et al. (2015) evaluó cinco razas cebuinas en el trópico de Brasil, donde hubo variación de los valores bajos de la TR seguida de la FR, sin embargo, encontró que la raza Girolando tuvo las TR más bajas y al mismo tiempo las FR más altas.

4.3 Componentes de varianza y parámetros genéticos.

Las varianzas y covarianzas genéticas aditivas, de ambiente permanente y residual para la producción de leche ajustada a 305 días se muestran en la tabla 7.

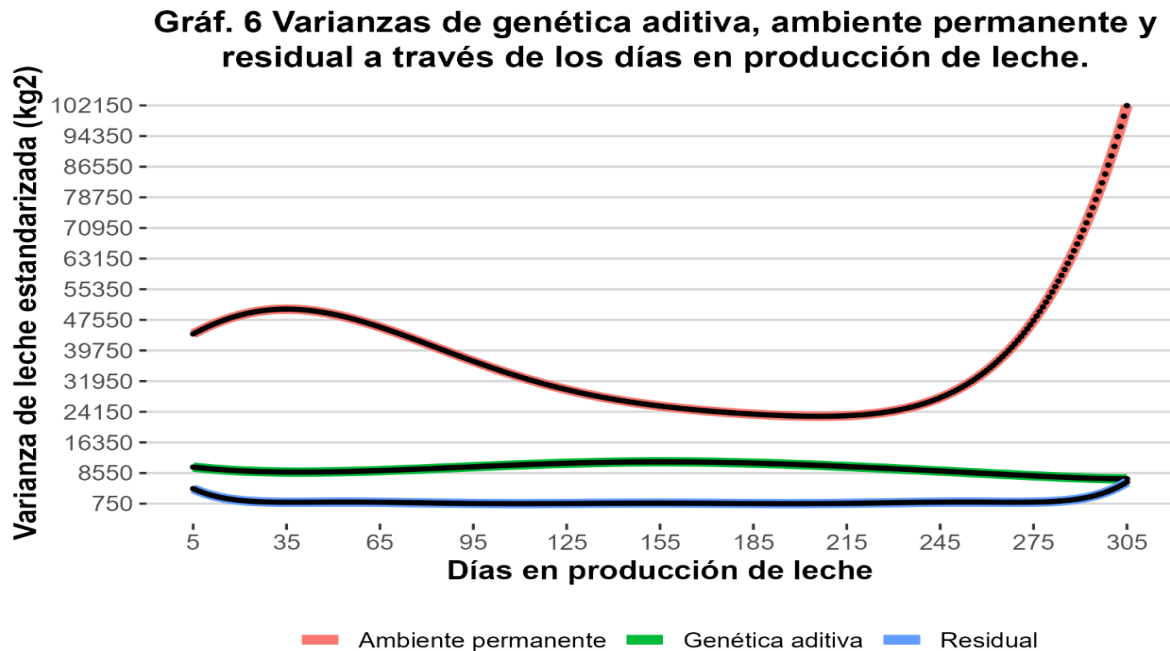
Tabla 7. Estimación de las varianzas genéticas aditivas, de ambiente permanente (sobre la diagonal), residual y sus covarianzas (arriba de la diagonal) con los diferentes coeficientes de los polinomios de Legendre orden cuatro.

Parámetro	Intercepto	1°	2°	3°	4°
σ^2a_0	17560.00	-618.80	-1506.00	-460.70	579.50
σ^2a_1		1465.00	224.70	-279.30	-133.80
σ^2a_2			253.30	61.13	-71.53
σ^2a_3				113.60	8.94
σ^2a_4					33.28
σ^2p_0	66860.00	-2722	9748	6420	-845.80
σ^2p_1		1158.00	86.74	5.75	61.02
σ^2p_2			5575.00	3152.00	-533.50
σ^2p_3				1932.00	-208.10
σ^2p_4					121.90
σ^2e			501.60		

σ^2a : varianza genética aditiva, σ^2p : varianza del ambiente permanente, σ^2e : varianza residual, 1°: efecto de orden uno, 2°: efecto de orden dos, 3°: efecto de orden tres, 4°: efecto de orden cuatro.

La varianza aditiva y de ambiente permanente van disminuyendo conforme aumenta el grado del polinomio de Legendre. La varianza aditiva es menor a comparación de la varianza de ambiente permanente (Aguilar et al., 2009; Boonkum et al., 2011 y Landi et al., 2023), dada por una mayor variación del ambiente

permanente en las diferentes lactancias y estaciones de las vacas multíparas, las cuales en ganado Holstein se ha reportado que son más susceptibles al estrés calórico a comparación de las de primer parto (Aguilar et al., 2009 y Bernabucci et al., 2014).



En la gráfica 6 se muestran las varianzas: genética aditiva, ambiente permanente y residual en los diferentes días en leche.

Durante el primer y último tercio de la lactancia tiene un mayor peso el ambiente permanente; mientras que del día 155 al 200 hay mayor respuesta genética, debido a la disminución de la influencia del medio ambiente (Rincón et al., 2015). Después de los 245 días el ambiente permanente cobra bastante fuerza que empieza a incrementarse a través de los siguientes días, en sentido contrario (primeros días de producción de leche) Aguilar et al. (2009) encontró la misma tendencia del aumento en la varianza permanente dando una forma de U a través de los días en producción de leche. Los resultados obtenidos de la varianza genética aditiva fueron menores a comparación del ambiente permanente que fue 12 veces mayor en los últimos días. Landi et al. (2023) encontró que los valores más altos de la varianza fenotípica fueron entre 75 a 85 unidades del ITH, lo que indica que la sensibilidad al estrés por calor es específica de la vaca y en su mayoría adquirida en lugar del aspecto genético concordando con Boonkum et al. (2011) y Boonkum y Duangjinda (2015).

En la tabla 8 se muestran las heredabilidades y repetibilidades obtenidas en sentido estricto con las varianzas de genética aditiva, ambiente permanente y la residual descritas anteriormente en la tabla 9; encontradas al calcular cada orden por separado que incluye los coeficientes de los polinomios de Legendre dependiente del orden asignado.

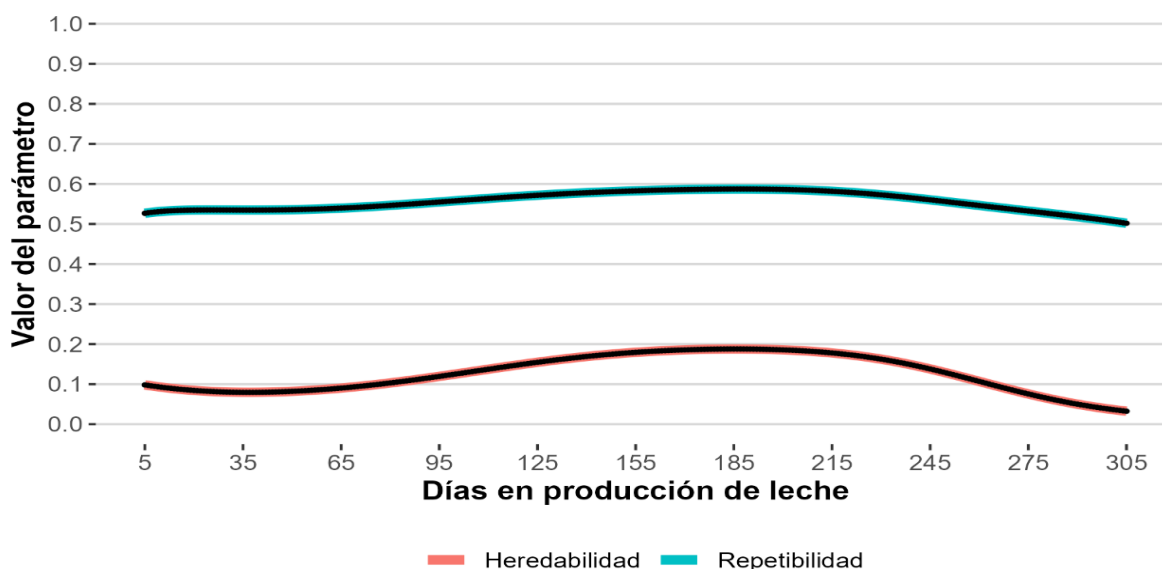
Tabla 8. Heredabilidades y repetibilidades con diferente orden de los polinomios de Legendre (del uno al cuatro) en la población de vacas Suizo Pardo.

Parámetro	1°		2°		3°		4°	
	h ²	re	h ²	Re	h ²	re	h ²	Re
Intercepto	0.19	0.99	0.20	0.99	0.15	0.99	0.21	0.99
1°	0.02	0.90	0.15	0.92	0.51	0.92	0.47	0.84
2°			0.09	0.47	0.09	0.96	0.04	0.92
3°					0.05	0.88	0.05	0.80
4°							0.05	0.24
Promedio	0.11	0.95	0.15	0.79	0.20	0.94	0.16	0.76

1°-4°: efecto del orden uno al orden cuatro, respectivamente; h²: heredabilidad, re: repetibilidad.

Los promedios de las heredabilidades en los diferentes grados (1 al 4) del polinomio de Legendre asignados varían entre 0.11 a 0.20 y las repetibilidades de 0.76 a 0.95. A medida que se le añade un grado más se ajusta mejor la variación de la heredabilidad y la repetibilidad. Para la interpretación de los resultados se utilizó un polinomio de grado cuatro con heredabilidades entre 0.05 a 0.47 y repetibilidades de 0.24 a 0.99. Estos valores promedio estuvieron dentro de lo reportado previamente en ganado Suizo Pardo en Brasil y Turquía (0.37) por Rennó *et al.* (2002), Bakir *et al.* (2004) y Landi *et al.* (2023); por otra parte, la heredabilidad dada en el intercepto es similar a lo reportado por Tilki *et al.* (2009) en Turquía. En la gráfica 7 se muestran las heredabilidades y repetibilidades durante los días en producción de leche.

Gráf. 7 Heredabilidades y repetibilidades conforme avanzan los días en producción de leche.



La heredabilidad de la producción de leche ajustada a 305 días varía de 0.03 a 0.19 en el transcurso de la lactancia, este rango es similar a las obtenidas en vacas Italianas Suizo Pardo por Landi et al. (2023), por Bernabucci et al. (2014) en vacas Holstein Italianas de segundo y tercer parto y en ganado Jersey y Holstein colombiano 0.15 y 0.16, respectivamente (Rincón et al., 2015). En Etiopía Meseret y Negussie (2017) encontraron heredabilidades que oscilaron de 0.15 a 0.28 en vacas Holstein en los primeros tres partos, por otro lado, en Turquía Tilki et al. (2009) y Nguyen et al. (2016) en Australia con ganado Holstein de primer parto obtuvieron un resultado similar al límite superior de la heredabilidad obtenida en este estudio para producción diaria de leche y está por debajo a lo reportado en Veracruz México con ganado Holstein y Suizo Pardo (0.28) por Ríos et al. (2012), igualmente en vacas Suizo Pardo turcas de primer parto por Şahin et al. (2014), en vacas Holstein Italianas por Bernabucci et al. (2014), así mismo Nguyen et al. (2016) en las primeras tres lactancias de ganado Holstein (0.22) y Jersey (0.33) y Santana et al. (2016) en Brasil. Lo anterior demuestra que el ambiente permanente tuvo una influencia importante sobre el índice de selección y sólo una pequeña parte de la variación fenotípica encontrada para la PLT se debe a efectos genéticos aditivos (Boonkum et al., 2011 y Rincón et al., 2015)

Las repetibilidades variaron de 0.50 a 0.59 durante los primeros 305 días de la producción de leche, fue similar a lo reportado por *Bakir et al. (2004)*, sin embargo, fueron altas a comparación de lo reportado (0.40) por *Rennó et al. (2002)*, *Ríos et al. (2012)* y *Rincón et al. (2015)* en ganado Holstein y Jersey colombiano (0.30 y 0.32, respectivamente). Lo anterior da pauta a que hay una alta asociación positiva entre registros sucesivos del mismo animal, en este sentido, es posible la toma de decisiones relacionadas a la eliminación de vacas luego de la obtención de sus primeros registros de producción de leche ajustada a 305 días, sin necesidad de esperar registros siguientes (*Pérez y Gómez, 2005*)

4.4 Correlaciones genéticas y fenotípicas.

En la tabla 11 aparecen las correlaciones genéticas entre la PLT con la FR, TR e ITH con los diferentes en los diferentes coeficientes de Legendre.

Tabla 9. *Correlaciones genéticas de la producción de leche ajustada a 305 días con la frecuencia respiratoria (FR), temperatura rectal (TR) e índice temperatura-humedad (ITH).*

Parámetro	FR	TR	ITH
Intercepto	-0.03	0.05	0.62
1°	0.45	-0.34	-0.86
2°	-0.15	0.44	-0.72
3°	-0.61	0.74	-0.37
4°	-0.21	0.21	0.83

1°: efecto de orden uno, 2°: efecto de orden dos, 3°: efecto de orden tres, 4°: efecto de orden cuatro.

Las correlaciones genéticas con un efecto de orden cuatro variaron entre bajas a altas. El intercepto se interpreta como el nivel de producción cuando la covarianza es nula mientras que los coeficientes de grado uno y dos muestran cómo cambia el patrón de respuesta individual de la característica (habilidad de respuesta) (*Santana*

et al., 2016 y Landi et al., 2023). La correlación entre la PLT y la FR dio una relación moderada negativa (-0.61), que influye en la disminución de leche cuando la FR aumenta independientemente de la respuesta al medio ambiente, sin embargo, con el efecto lineal ambas van a la par. La correlación entre la PLT y la TR más alta encontrada fue en el efecto grado tres, la cual fue positiva (0.74), mientras en el orden uno fue negativa viéndose en una disminución, estas correlaciones no se han reportado en estudios a nivel internacional bajo estrés calórico. La correlación de la PLT con el ITH fue mayor a diferencia de las anteriores (-0.86), afectando la PLT, sin en cambio también tuvo un valor similar de forma positiva en el efecto de grado cuatro.

El resultado de las altas correlaciones negativas del ITH sobre la producción de leche es similar a lo reportado por *Santana et al. (2016)* en vacas Holstein y *Nguyen et al. (2016)* con ganado Holstein y Jersey, donde se dice que tiene un efecto antagonista por la correlación alta de la producción de leche, lo cual nos da la pauta para a la hora de realizar una selección a la característica de resistencia al estrés calórico se contemple el efecto que tendrá en la producción de leche (*Misztal y Ravagnolo, 2002; Aguilar et al., 2009; Boonkum y Duangjinda, 2015; Nguyen et al., 2016 y Cuellar et al., 2023*). En la tabla 12 se visualizan las correlaciones fenotípicas entre la PLT con la FR, TR e ITH; entre los diferentes partos.

Tabla 10. *Correlaciones fenotípicas de la producción de leche total ajustada a 305 días con la frecuencia respiratoria (FR), temperatura rectal (TR) e Índice de temperatura-humedad (ITH).*

Parámetro	FR	TR	ITH
PLT	-0.03*	-0.02 ^{NS}	-0.01 ^{NS}

* $p < .05$, NS= no significativo

Las correlaciones entre la PLT con la FR, TR e ITH fueron bajas y negativas, sin embargo, solo la FR fue significativa, esta última (-0.03, $p < 0.05$), es menor a lo reportado por *Leyva et al. (2015)* en Sonora, México, donde realizó un estudio con ganado Holstein utilizando dos tratamientos con el sistema de enfriamiento, el primero

fue antes de cada ordeña (EPO), declarando las siguientes correlaciones -0.55 y -0.53 ($p < 0.001$) para la FR y TR, respectivamente, ésta última en nuestro estudio no fue significativa. El segundo tratamiento fue realizado cada dos horas (EA) en donde encontró correlaciones negativas menores a la del primer tratamiento, -0.34 y -0.37 para FR y TR, respectivamente; sin embargo, el ITH en este grupo no fue significativo; esta diferencia se debió a la aclimatación que logró alcanzar los animales en el EPO a diferencia del EA donde los baños adicionales causaron que los animales cursaran por un estrés oscilante y de pocas horas. Lo anterior se debe a que a medida que aumenta la FR principalmente, desciende la producción de leche, indirectamente por la disminución de la ingesta del alimento bajo condiciones de estrés calórico (Carabaño, 2016).

Los resultados encontrados en este estudio se complementan con lo encontrado por Núñez *et al.* (2023), quienes a través de un estudio de asociación genómica (GWAS) identificaron siete polimorfismos de nucleótido único (SNP) asociados a la resistencia del estrés calórico que afectan al cambio de la frecuencia respiratoria, en 95 vacas genotipadas (proceso que determina la secuencia del ADN en las posiciones dentro del genoma del individuo) del mismo rancho San Pedro. Derivado de los resultados previstos se pone a discusión el comportamiento de la FR y TR que se encontró en este estudio, dando pie a una regulación de la FR y TR por los genes asociados a la resistencia del estrés calórico (Carabaño, 2016 y Cuellar *et al.*, 2023).

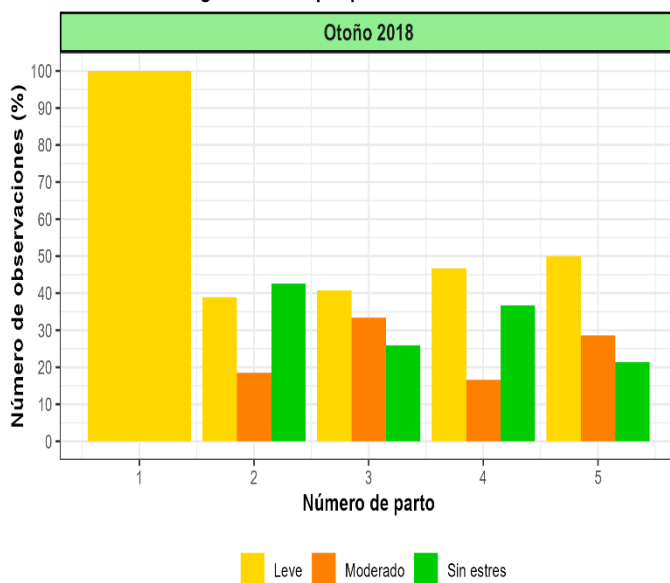
V. CONCLUSIÓN

Las correlaciones genéticas entre la producción de leche con el ITH, FR y TR fueron altas y negativas para los primeros dos parámetros y positiva para la TR, con unas heredabilidades bajas a moderadas (0.03 a 0.19) y repetibilidades moderadas (0.5 a 0.59) que concuerdan con lo reportado por otros autores en ganado Suizo Pardo y Holstein Italiano. La población estudiada ha desarrollado mecanismos de autorregulación bajo las condiciones climatológicas adversas presentadas con mayor énfasis durante el verano, donde afectó negativamente la frecuencia respiratoria, sin embargo, la temperatura rectal y la producción de leche no se vio mermada, favoreciendo el desarrollo a la resistencia al estrés calórico. Se sugiere reproducir lo anteriormente realizado en los ranchos de la región con ganado Suizo Pardo para complementar la información obtenida y así posteriormente realizar un programa de mejoramiento genético para la resistencia del estrés calórico en el estado de Yucatán.

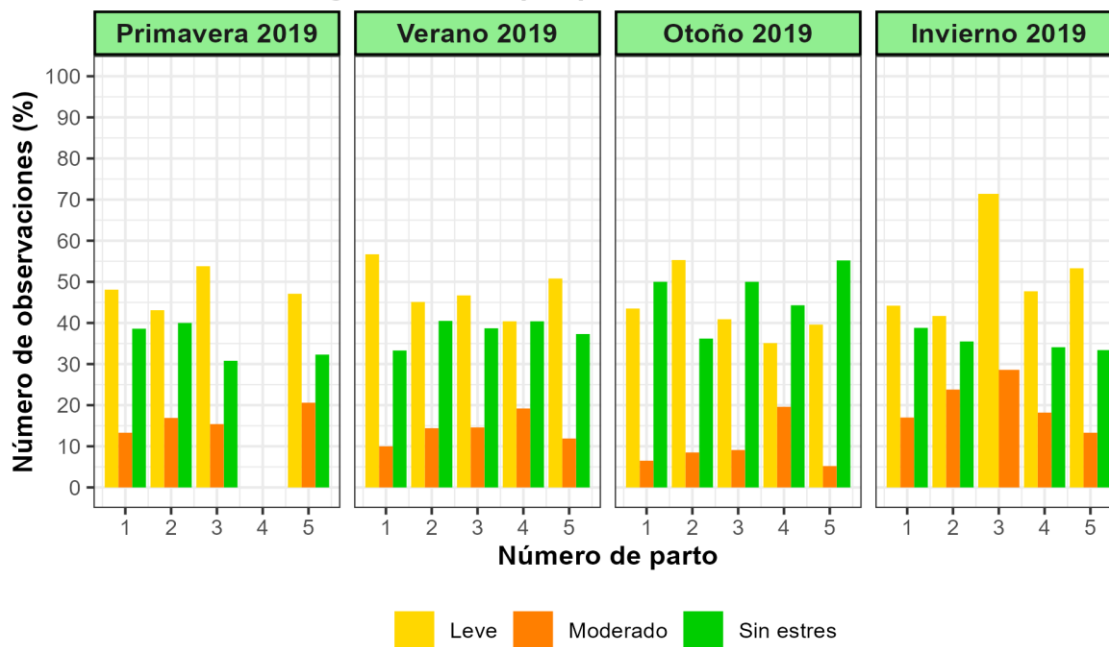
VI. ANEXOS

Los gráficos del 8-18 corresponden al porcentaje del número de observaciones en cada categoría del ITH por lactación, previamente se realizó una filtración por número-época de parto y época de muestreo. Vacas que parieron en otoño 2018, primavera, verano, otoño e invierno 2019 y tuvieron muestreos durante otoño 2019.

Gráf. 8 Porcentaje del número de observaciones dentro de cada categoría del ITH por parto durante otoño 2019.

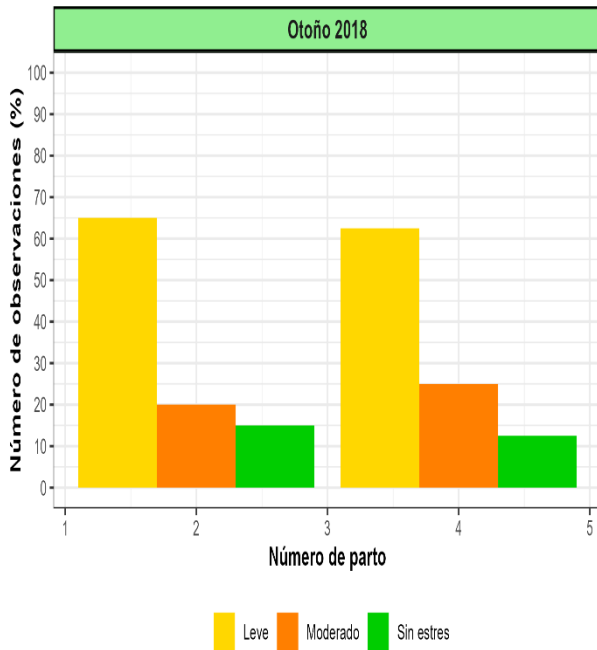


Gráf. 9 Porcentaje del número de observaciones dentro de cada categoría del ITH por parto durante otoño 2019.

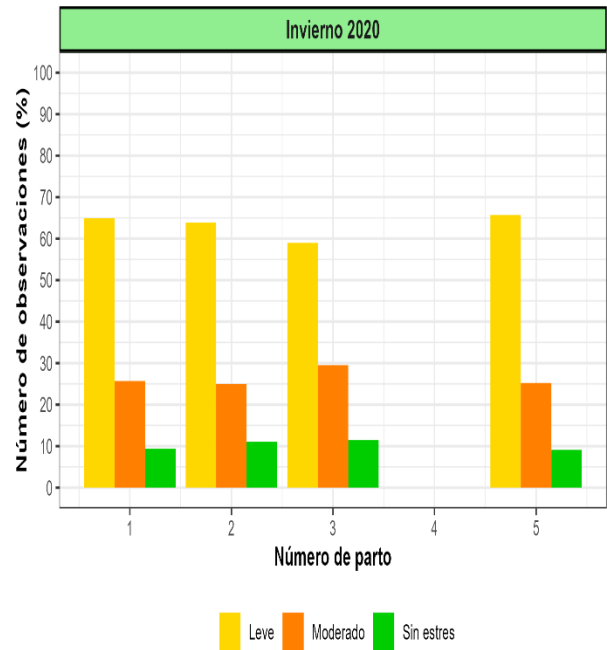


Vacas que parieron en otoño 2018, primavera, verano, otoño e invierno 2019, invierno 2020 y tuvieron muestreos durante invierno 2020.

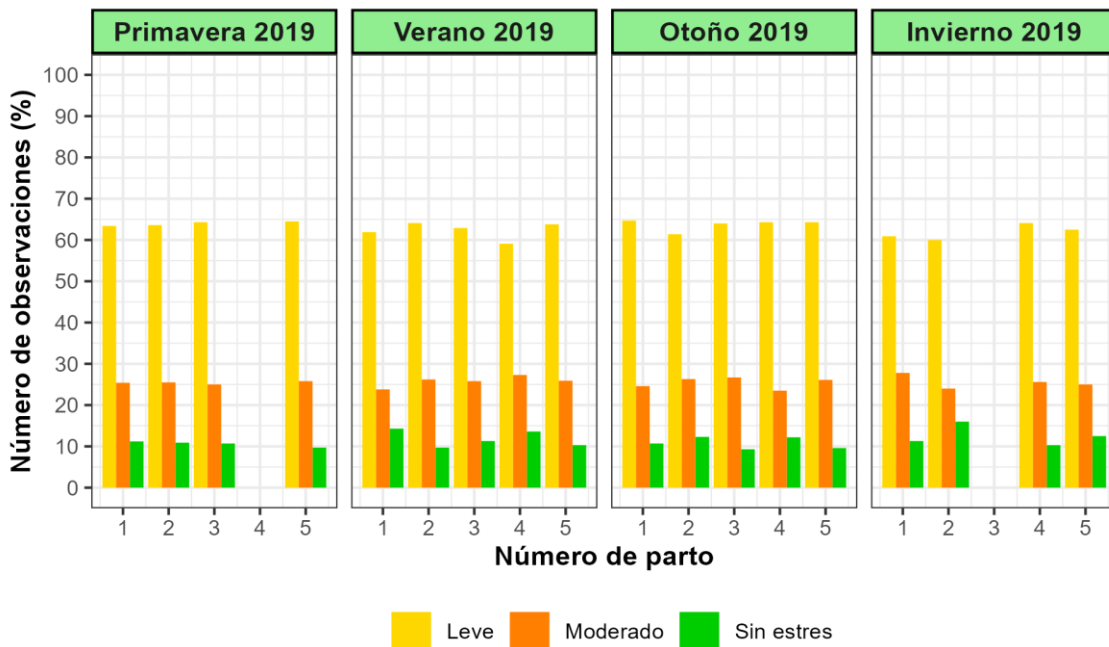
Gráf. 10 Porcentaje del número de observaciones dentro de cada categoría del ITH por parto durante invierno 2020.



Gráf. 12 Porcentaje del número de observaciones dentro de cada categoría del ITH por parto durante invierno 2020.

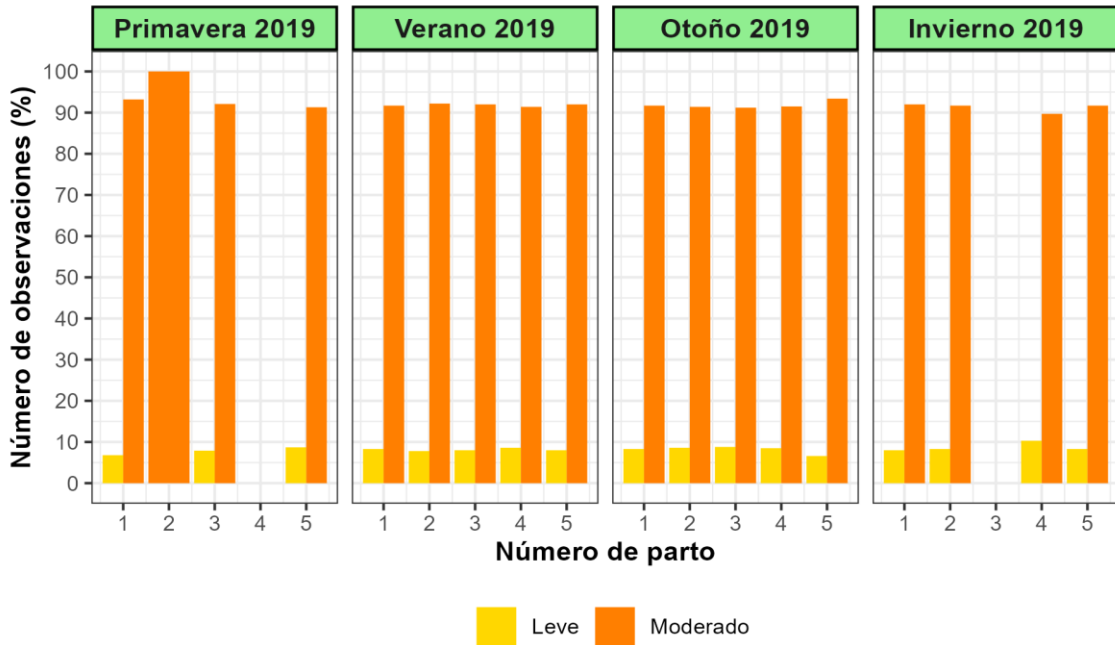


Gráf. 11 Porcentaje del número de observaciones dentro de cada categoría del ITH por parto durante invierno 2020.

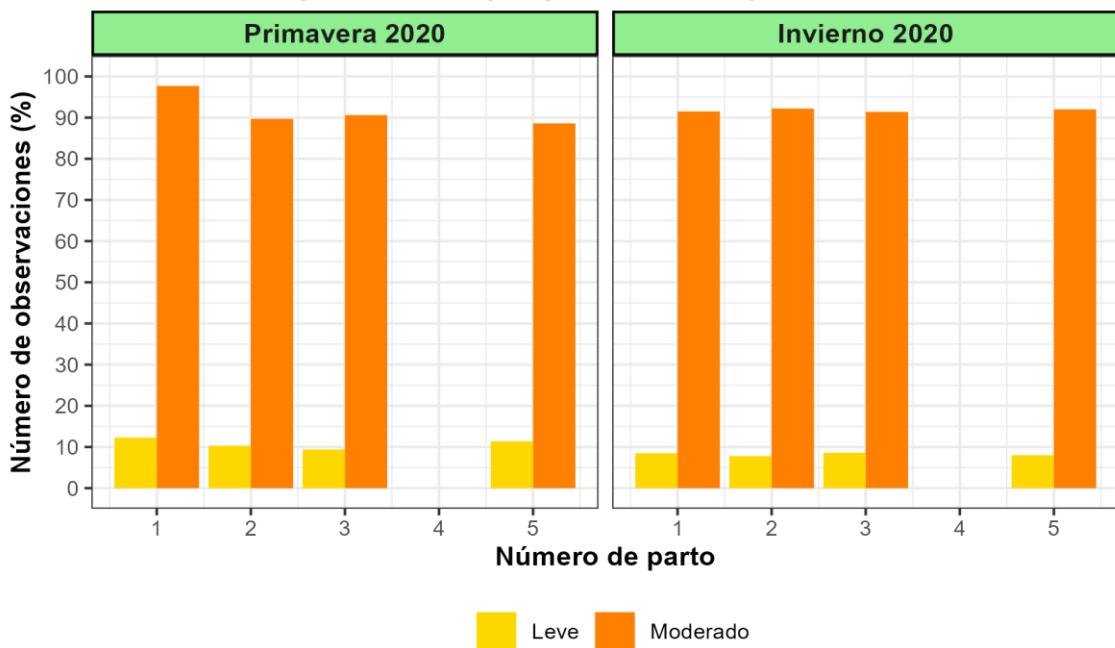


Vacas que parieron en primavera, verano, otoño e invierno 2019, primavera e invierno 2020 y tuvieron muestreos durante primavera 2020.

Gráf. 13 Porcentaje del número de observaciones dentro de cada categoría del ITH por parto durante primavera 2020.

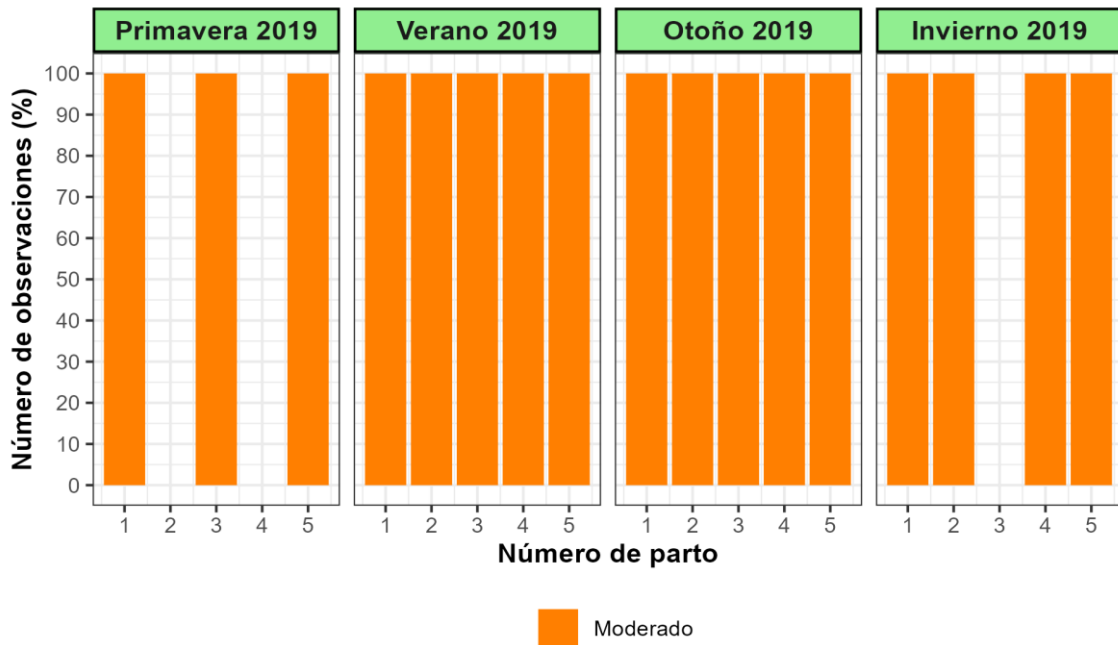


Gráf. 14 Porcentaje del número de observaciones dentro de cada categoría del ITH por parto durante primavera 2020.

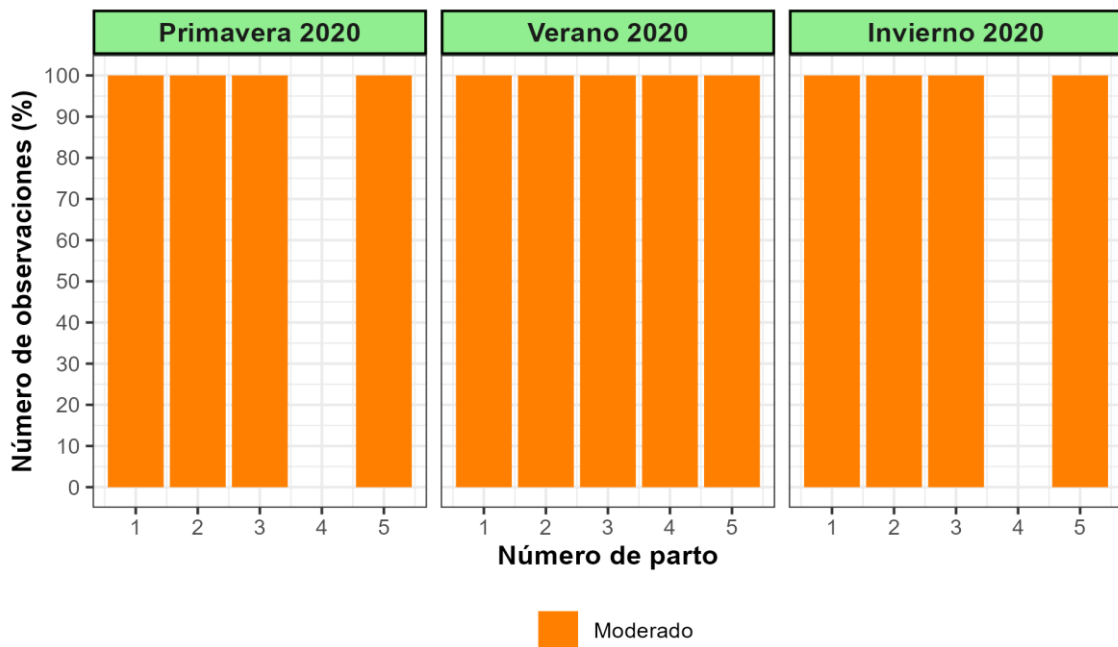


Vacas que parieron en primavera, verano, otoño e invierno 2019, primavera, verano e invierno 2020 y tuvieron muestreos durante verano 2020.

Gráf. 15 Porcentaje del número de observaciones dentro de cada categoría del ITH por parto durante verano 2020.

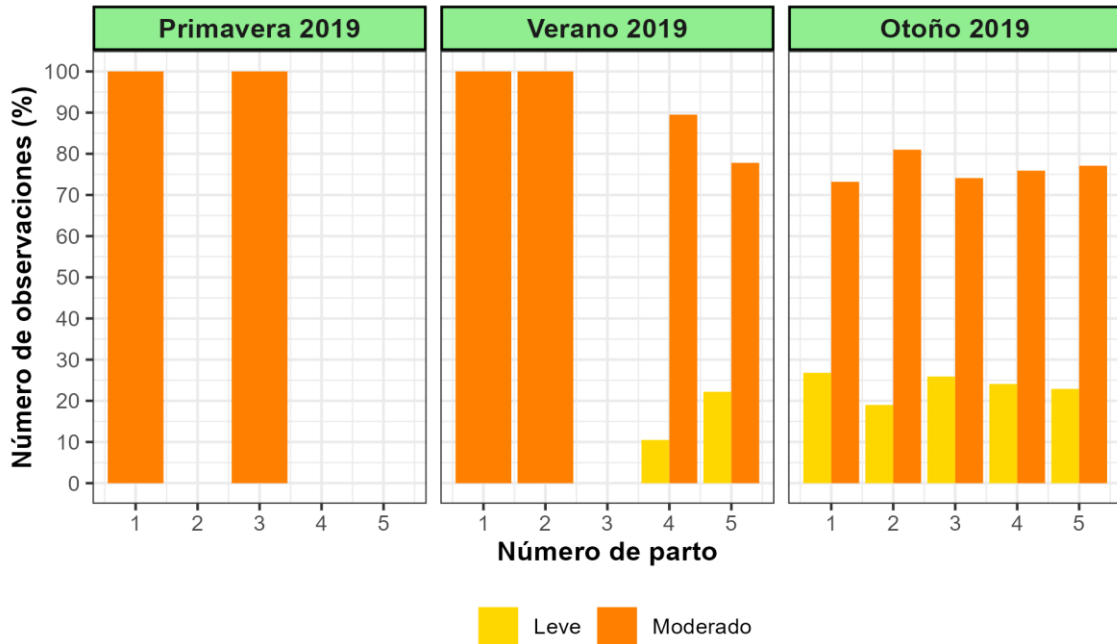


Gráf. 16 Porcentaje del número de observaciones dentro de cada categoría del ITH por parto durante verano 2020.

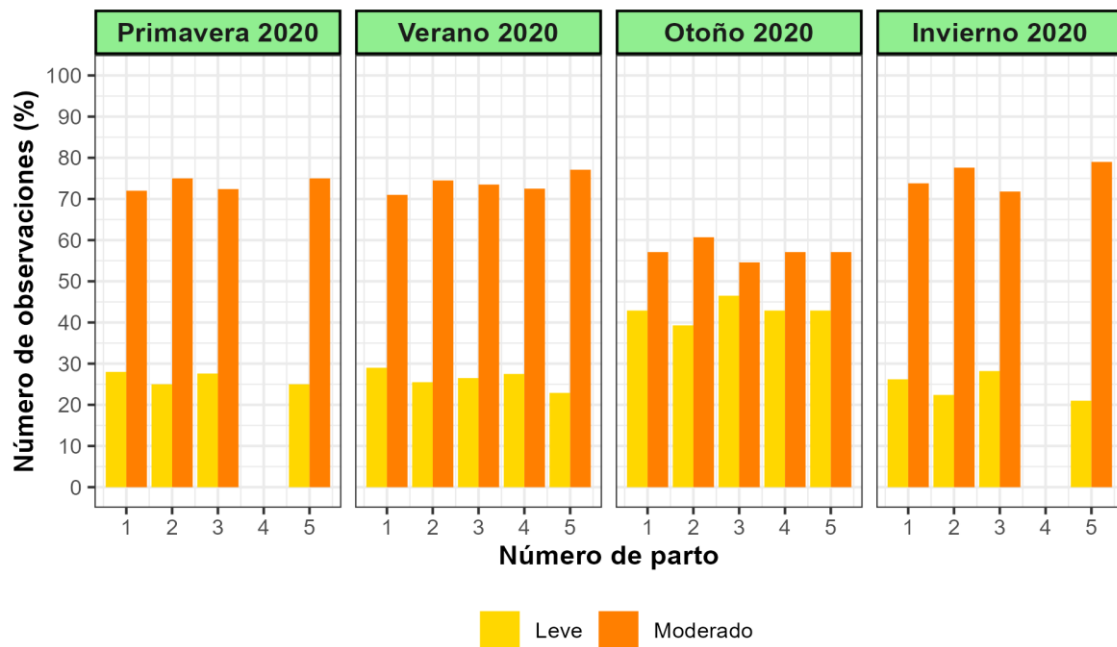


Vacas que parieron en primavera, verano y otoño 2019, primavera, verano, otoño e invierno 2020 y tuvieron muestreos durante otoño 2020.

Gráf. 17 Porcentaje del número de observaciones dentro de cada categoría del ITH por parto durante otoño 2020.

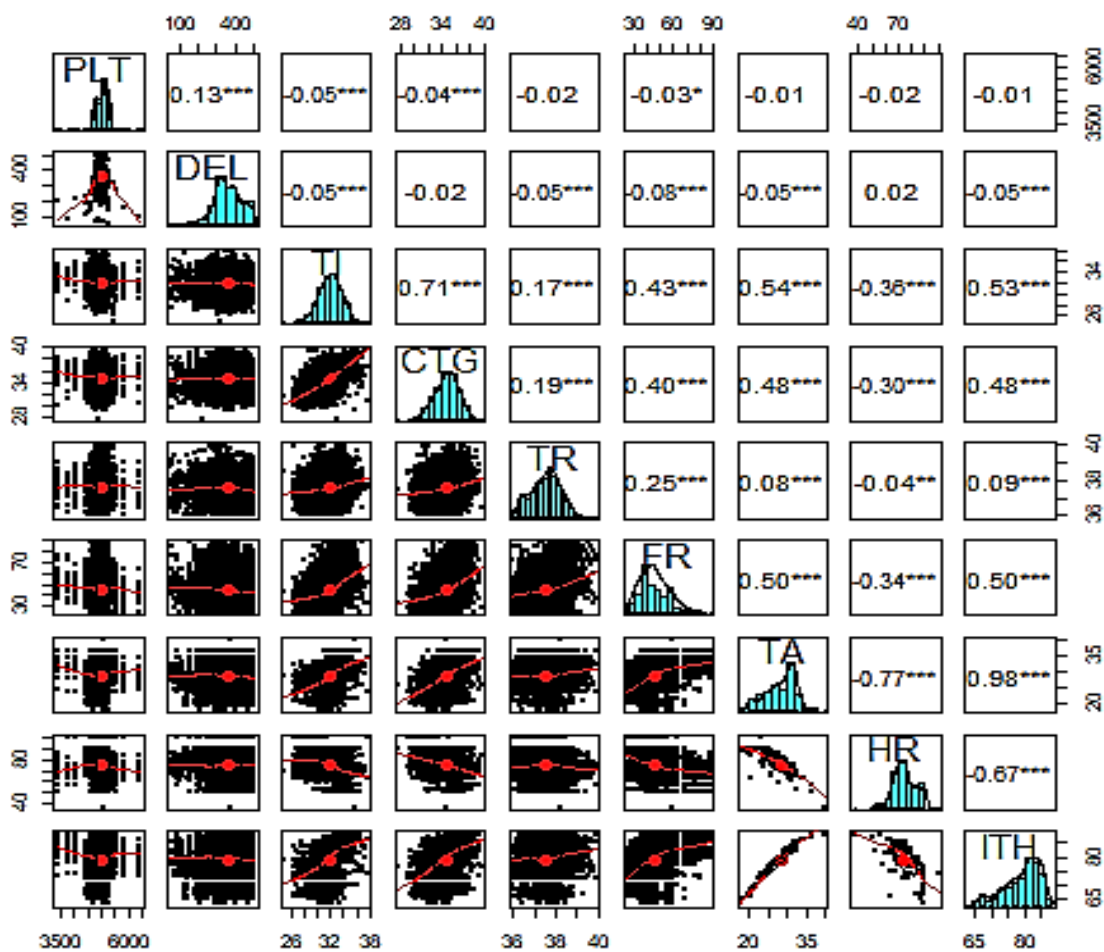


Gráf. 18 Porcentaje del número de observaciones dentro de cada categoría del ITH por parto durante otoño 2020.



En la figura 2 se muestran las correlaciones fenotípicas entre las variables productivas, fisiológicas y ambientales encontradas en la población de vacas Suizo Pardo del rancho San Pedro.

Fig. 2 Correlaciones fenotípicas entre las variables productivas, fisiológicas y ambientales de la población Suizo Pardo.



* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

VII. BIBLIOGRAFÍA

Aguilar I., Misztal I. y Tsuruta S. (2009). Genetic components of heat stress for dairy cattle with multiple lactations. *Journal of Dairy Science*. 92 (11): 5702-5711.

Al-Ghussain L. (2019). Global Warming: Review on driving forces and mitigation. *Environmental Progress y Sustainable Energy*. 38(1):13-21.

Ammer S., Lambertz C. y Gauly M. (2016). Is reticular temperature a useful indicator of heat stress in dairy cattle? *Journal of Dairy Science*. 99(12): 10067-10076.

Araúz E.E., Fuentes A. y Méndez N. (2010). Alteración diurna de la carga calórica corporal e interrelación de las temperaturas rectal y láctea en vacas cruzadas (6/8 *Bos Taurus* x 2/8 *Bos indicus*), Suizo Pardo y Holstein bajo estrés calórico diurno durante la época seca en el clima tropical húmedo. *Revista Electrónica de Veterinaria*. 11(11): 1-36.

Bakir G., Kaygisiz A. y Ülker H. (2004). Estimates of genetic parameters of milk yield in Brown Swiss and Holstein Friesian cattle. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 7 (7): 1198-1201.

Bang N.N., Gaughan J.B., Hayes B.J., Lyons R.E y McNeill D.M (2022). Application of infrared thermal technology to assess the level of heat stress and milk yield reduction of cows in tropical smallholder dairy farms. *Journal of Dairy Science*. 105 (10):8454-8469.

Barragán W.A., Mahecha L. y Cajas Y.S. (2015). Variables fisiológicas-metabólicas de estrés calórico en vacas bajo silvopastoreo y pradera sin árboles. *Agronomía Mesoamericana*. 26(2): 211-223.

Boonkum W., Misztal I., Duangjinda M., Pattarajinda V., Tumwasorn S. y Sanpote J. (2011). Genetic effects of heat stress on milk yield of Thai Holstein crossbreds. *Journal of Dairy Science*. 94(1): 487-492.

Boonkum W. y Duangjinda M. (2015). Estimation of genetic parameters for heat stress, including dominance gene effects, on milk yield in Thai Holstein dairy cattle. *Animal Science Journal*. 86: 245-250.

Caballero R. A. (2017). Estimación de valores, varianzas y covarianzas genéticas. *Genética cuantitativa* (153-181 pp.). SÍNTESIS.

Caiza V.E. (2021). Efecto del índice temperatura y humedad (ITH) en la productividad y eficiencia reproductiva en vacas lecheras. Título de licenciatura. Universidad Agraria del Ecuador. Guayaquil, Ecuador.

Carabaño M.J. (2016). El desafío de la selección genética de animales tolerantes al estrés por calor. El caso del ganado bovino lechero. Archivos Latinoamericanos de Producción Animal. 24(2): 69-73.

Carabaño M. J., Logar B., Bormann J., Minet J., Vanrobays M., Díaz C., Tychon B., Gengler N. y Hammami H. (2016). Modeling heat stress under different environmental conditions. Journal of Dairy Science. 99(5): 3798-3814.

Cardoso C.C., Peripolli V., Amador S.A, Brandão E.G., Esteves G.I., Sousa C.M., França M.F., Gonçalves F.G., Barbosa F.A., Montalvão T.C. y Martins C.F. (2015). Physiological and thermographic response to heat stress in zebu cattle. Livestock Science. 182: 83-92.

Cerqueira J., Araújo J., Blanco-Penedo I., Cantalapiedra J., Silvestre A. y Silva S. (2016). Predicción de estrés térmico en vacas lecheras mediante indicadores ambientales y fisiológicos. Archivos de zootecnia. 65(251): 357-364.

Corrales I.E. (2014). El efecto del estrés calórico en bovinos de leche. Monografía de licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Torreón, Coahuila, México.

Cuellar C.J., Saleem M., Jensen L.M. y Hansen P.J. (2023). Differences in body temperature regulation during heat stress and seasonal depression in milk yield between Holstein, Brown Swiss and crossbred cows. Journal of Dairy Science. 106 (5).

Dash S., Chakravarty A.K., Singh A., Upadhyay A., Singh M., y Yousuf S. (2016). Effect of heat stress on reproductive performances of dairy cattle and buffaloes: A review. Veterinary World. 9(3): 235-244.

Deak, F. L. G. B., Chacur, M. G. M., de Souza, C. D., Andrade, I. B., Cornacini, G. F., García, A. R., y Gabriel, L. R. A. (2019). Effects of physiological stage and season on infrared thermograms of different body areas of dairy cows raised under tropical conditions. Animal reproduction, 16(2), 311–316.

Dikmen S. y Hansent P.J. (2009). Is the temperature-humidity index the best indicator of heat stress in lactating dairy cows in a subtropical environment? *Journal of Dairy Science*. 92(1): 109 - 106.

Dikmen S., Khan G.A., Huson H.J., Sonstegard T.S., Mosses J.I., Dahl G.E. y Hansen P.J. (2014). The SLICK hair locus derived from Senepol cattle confers thermotolerance to intensively managed lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science*. *Mljekarstvo*. 97(9): 5508-5520.

Enríquez A.V. y Álvarez A. (2020). Caracterización del índice de temperatura y humedad y el estrés calórico en el ganado bovino de leche en dos lecherías en la provincia Mayabeque, Cuba. *Cuban Journal of Agricultural Science*. 54(1).

Espinoza J., Ortega R., Palacios A. y Guillén A. (2011). Tolerancia al calor y humedad atmosférica de diferentes grupos raciales de ganado bovino. *Revista MVZ Córdoba*. 16(1): 2302-2309.

Fernández I. G., Ulloa R. y Fernández J. (2019). Milk Yield did not decrease in large herds of high producing Holstein Cows in semi-arid climate of México. *Tropical Animal Health and Production*. 51(1): 149-154.

Fodor N., Foskolos A., Topp C.F., Moorby J.M., Pásztor L. y Foyer C.H. (2018). Spatially explicit estimation of heat stress-related impacts of climate change on the milk production of dairy cows in the United Kingdom. *PLOS ONE*. 13(5): 1-18.

Gantner V., Bobic T., Gregic M., Gantner R., Kuterovac K. y Potocnik K. (2017). The differences in heat stress resistance due to dairy cattle breed. 67(2): 112-122.

García E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de KÖPPEN. Instituto de geografía-UNAM. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>

Grolemund G. y Wickham H. (2011). Dates and times made easy with lubridate. *Journal of Statistical software*, 40(3): 1-25. <https://www.jstatsoft.org/v40/i03/>

Hansen P. J. 2004. Physiological and cellular adaptations of zebu cattle to thermal stress. *Animal Reproduction Science*. 82–83:349–360.

Hernández A., Cervantes P., Salinas V.M. García R., Tejeda A., Gallardo F., y Álvarez J.L. (2007). Respuesta al estrés por calor en la vaca Criollo lechero tropical bajo un sistema de doble propósito en México. *Rev. Salud Anim*. 29(2): 85-90.

Hernández A., Domínguez B., Cervantes P., Muñoz S., Salazar S. y Tejeda A. (2011). Temperature-humidity index (THI) 1917-2008 and future scenarios of livestock comfort in Veracruz, México. *Atmósfera*. 24(1): 89-102.

Hernández N., Martínez J.C., Parra G.M. y Cienfuegos E.G. (2016). Importancia de la interacción genotipo x ambiente en rasgos de producción en ganado lechero. *Revista CienciaUAT*. 10(2): 72- 78.

INEGI (2021). Aspectos geográficos. Yucatán, México. Pág. 9:12.

Kıbar M., Yılmaz A. y Bakir G. (2018). Sıcaklık Nem İndeks Değerlerinin Süt Sığırıcılığı Açısından Değerlendirilmesi: Siirt İli Örneği. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*. 5(1): 45-50.

Kinghorn B.P. (2022). Pedigree Viewer [Software]. <https://bkinghor.une.edu.au/pedigree.htm>

Landi V., Maggiolino A., Cecchinato A., Mota L., Bernabucci U., Rossoni A. y Pasquale De Palo (2023). Genotype by environment interaction due to heat stress in Brown Swiss cattle. *J.Dairy Sci*. 106:1889-1909.

Leyva J.C, Armenta D.I, Zamorano R., Thomas M.G, Rincón G., Medrano J.F., Rivera F., Reyna J.R. y Luna P. (2015). Variables climáticas asociadas a la producción de leche en vacas Holstein criadas bajo condiciones de estrés por calor del Valle del Yaqui, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*. 11(1): 1-11.

Lodi D.J., Tavares G.F., Schiassi L. y Araujo H.B. (2014). Uso da termografia na avaliação do conforto térmico de vacas holandesas em lactação. XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola- CONBEA 2014. Campo Grande – MS, Brasil.

López B. (2015). Factores de ajustes (proyecto PAPIME). FESC UNAM. <http://geneticamvz.blogspot.com/>

Lucena C. (2014). Efecto del estrés calórico sobre parámetros de la curva de lactancia de un rebaño lechero en el trópico. *Gaceta de Ciencias Veterinarias*. 19(1): 11-16.

Macciotta N.P., Biffani S., Bernabucci U., Lacetera N., Vitali A., Ajmone- Masan P. y Nardone A. (2017). Derivation and genome-wide association study of a principal component-based measure of heat tolerance in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*. 100(6): 4683-4697.

Maggiolino A., Dahl G.E., Bartolomeo N., Bernabucci U., Vitali A., Serio G., Cassandro M., Centoducati G., Santus E., y De Palo P. (2020). Estimation of maximum thermo-hygrometric index thresholds affecting milk production in Italian Brown Swiss cattle. *Journal of Dairy Science*. 103 (9): 8541-8553.

Martínez C.A, Manrique C., y Elzo M.A. (2012). La evaluación genética de vacunos: una percepción histórica. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 25: 293-311.

Masuda, Y. (2018). Introduction to BLUPF90 suite programs. University of Georgia. <http://nce.ads.uga.edu/wiki/doku.php?id=documentation>

Meseret S. y Negussie E. (2017). Genetic parameters for test-day milk yield in tropical Holstein Friesian cattle fitting a multiple-lactation random regression animal model. *South African Journal of Animal Science*. 47(3):352-361.

Misztal I. y Ravagnolo O. (2002). Studies on genetics of heat tolerance in Holstein. 7th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production. Montpellier, France 19-23.

Misztal, I., Tsuruta S., Lourenco D., Masuda Y., Aguilar I., Legarra A., y Vitezica Z. (2018). Manual for BLUPF90 family programs. University of Georgia. <http://nce.ads.uga.edu/wiki/doku.php?id=documentation>

Montanholi Y.R., Odongo N.E., Swanson K.C., Schenkel F.S., McBride B.W. y Miller S.P (2008). Application of infrared thermography as an indicator of heat and methane production and its use in the study of skin temperature in response to physiological events in dairy cattle (*Bos taurus*). *Journal of Thermal Biology*. 33: 468-475.

Mrode R.A. (2005). Linear models for the prediction of animal breeding values. CABI Publishing.

Mylostyvyi R., Lesnovskay O., Karlova L., Khmeleva O., Kalinichenko O., Orishchuk O., Tsap S., Begma N., Cherniy N., Gutyj B. y Izhboldina O. (2021). Brown Swiss cows are more heat resistant than Holstein cows under hot summer conditions of the continental climate of Ukraine. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. 9(4):1-8.

Nguyen T.T., Bowman P.J., Haile-Mariam M., Pryce J.E. y Hayes B.J. (2016). Genomic selection for tolerance to heat stress in Australian dairy cattle. *Journal of Dairy Science*. 99(4): 2849-2862.

Novomestky F. (2022). Orthopolynom: Collection of functions for orthogonal and orthonormal polynomials. <https://CRAN.R-project.org/package=orthopolynom>.

Núñez S.G., Berruecos J.M., Cala N., Magaña J.G., Ochoa P., Ulloa R. y Toledo H.O. (2023). Genome-wide association study for heat stress resistance in Brown Swiss cattle in Yucatán, México. *Veterinaria México OA*.10: 1-13.

Ochoa P. (1991). Mejoramiento genético del ganado bovino producto de leche. *Revista Ciencia Veterinaria*. (5): 67 – 88.

Oliveira F.G., Pinto H.C., Moya G., Carvalho E. y Mattos M.R. (2019). What is the best temperature-humidity index equation to indicate heat stress in crossbred dairy calves in a tropical environment? *Ciencia rural*. 49(1).

Pérez G.A. y Gómez M.G. (2005). Factores genéticos y ambientales que afectan el comportamiento productivo de un rebaño Pardo Suizo en el trópico. 1. Producción de leche. *Revista Científica*, XV (2),141-147.

Pérez M. (2017). Estimación de parámetros genéticos para características de producción considerando índices de temperatura – humedad en bovinos Ayrshire de Colombia. *Ciencia Unisalle*. Bogotá, Colombia.

Polsky L. y Keyserlingk M.A.G. (2017). Effects of heat stress on dairy cattle welfare. *Journal of Dairy Science*. 100 (11): 8645-8657.

R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Regino L.F. y Rodríguez J.K. (2019). Indicadores fisiológicos y medioambientales como predictores del estrés térmico en el ganado blanco orejinegro (BON) de la universidad de Cundinamarca. Tesis de licenciatura. Universidad de Cundinamarca.

Rennó F.P., Pereira J.C., Vieira C., Almeida R., Teixeira M., Navajas L., Oliveira R.F., y Rocha F. (2002). Aspectos Produtivos da Raça Pardo-Suíça no Brasil. Fatores de Ajustamento, Produção de Leite e de Gordura, e Parâmetros Genéticos. *R. Bras. Zootec*. 31 (5): 2043-2054.

Revelle, W. (2021). psych: Procedures for Personality and Psychological Research, Northwestern University. <https://CRAN.R-project.org/package=psych>

Rincón J., Zambrano J., y Echeverri J. (2015). Estimación de parámetros genéticos y fenotípicos para características de producción en ganado Holstein y Jersey Colombiano. *Revista MVZ Córdoba*. 20 (Supl): 4962-4973.

Ríos Á., Calderón R. C., Galavíz J. R., Vega V. E., y Lagunes J. (2012). Análisis genético de la producción láctea de vacas Holstein y Pardo Suizo en pastoreo intensivo en condiciones subtropicales. *Revista Científica*, XXII (6), 545-552.

Şahin A., Ulutaş Z., Adkinson A.Y. y Adkinson R.W. (2014). Genetic parameters of first lactation milk yield and fertility traits in Brown Swiss cattle. *Ann. Anim. Sci.* 14 (3), 545-557.

Santana M.L., Bignardi A.B., Pereira R.J., Stefani G., y El Faro L. (2016). Genetics of heat tolerance for milk yield and quality in Holsteins. *Animal*. 11(1): 4-14.

Saravia C. (2009). Efecto del estrés calórico sobre las respuestas fisiológicas y productivas de vacas Holando y Jersey. Tesis de maestría. Universidad de la república. El Salto, Uruguay.

Silva J., Salles I.C., Vieira M. F., Viana A.M., Ramos D., Lima A.N., Flores M.G., y Alencar A. (2017). Heat Stress and Body Temperature in Brown Swiss Cows Raised in Semi-Arid Climate of Ceará State, Brazil. *Acta Scientiae Veterinariae*. 45:1475.

Tilki M., Çolak M., y Sari M. (2009). Genetic parameters of 305-day milk yield for Brown Swiss reared in the Bahri Dağdaş International Agricultural Research Institute in Turkey. *Kafkas Univ. Vet. Fak. Derg.* 15 (3): 397– 400.

Toledo H.O., Ruiz F.J., Vásquez C.G., Berruecos J.M., y Elzo M.A (2014). Parámetros genéticos para producción de leche de ganado Holstein en dos modalidades de control de producción. *Rev. Mex. Cienc. Pecu*, 5(4): 443-457.

Wickham H. (2016). *Ggplot2: Elegant graphics for data análisis*. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org>

Wickham H., François R., Henry L., Müller K., y Vaughan D. (2021). *Dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>

Yadav B., Singh G., Wankar A., Dutta N., Chaturvedi V.B. y Verma M.R. (2016). Effect of Simulated Heat Stress on Digestibility, Methane Emission and Metabolic Adaptability in Crossbred Cattle. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 29(11): 1585-1592.