

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

---

INSTITUTO DE CIENCIAS AGRÍCOLAS



**CARACTERIZACIÓN DE LAS RESPUESTAS TERMOREGULATORIA Y  
PRODUCTIVA DE GANADO HOLSTEIN A TRAVÉS DEL USO DE MODELOS  
DE NORMA DE REACCIÓN**

**TESIS**

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN ANIMAL

**PRESENTA:**

MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ CASTRO

**DIRECTOR DE TESIS**

Ph.D. LEONEL AVENDAÑO REYES

MEXICALI, BAJA CALIFORNIA

ENERO DE 2016

La presente tesis titulada “CARACTERIZACIÓN DE LAS RESPUESTAS TERMOREGULATORIA Y PRODUCTIVA DE GANADO HOLSTEIN A TRAVÉS DEL USO DE MODELOS DE NORMA DE REACCIÓN”, fue realizada por **C. MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ CASTRO** fue dirigida por Ph.D. Leonel Avendaño Reyes siendo aceptada, revisada y aprobada por el Consejo Particular abajo indicado, como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN ANIMAL**

CONSEJO PARTICULAR

---

Ph.D. Leonel Avendaño Reyes

**DIRECTOR**

---

Dr. Ulises Macías Cruz

**SECRETARIO**

---

Ph.D. Pablo Luna Nevárez

**SINODAL**

---

Ph.D. Abelardo Correa Calderón

**SINODAL**

**“POR LA REALIZACIÓN PLENA DEL HOMBRE”**

Mexicali, Baja California, Enero de 2016

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a DIOS, porque gracias a él y a su divina voluntad, sigo teniendo el maravilloso regalo de la vida y la oportunidad de aprovechar mi tiempo para dejar una huella en este mundo.

Quiero agradecer infinitamente a toda mi familia, a mi madre Rosa Elvia Castro Valenzuela, mis hermanos Ana Laura, José Antonio, Dora Elena y María de la Luz (Lucero), así como también a mis sobrinos Sebastián y Johana; porque sin ustedes y su apoyo jamás me hubiera sido posible salir adelante en mis proyectos personales y académicos, ¡Muchas gracias!

A mi pareja Arhemy Pineda Montes, porque siempre estuviste presente (aún a pesar de la distancia) en todos los momentos críticos por los que pasé durante ésta etapa llamada Maestría, demostrándome amor, cariño, paciencia y comprensión, simplemente no creo que existan palabras suficientes para agradecerte tanto apoyo, ¡Gracias!

A todos los integrantes de mi comité evaluador: Ph.D. Leonel Avendaño Reyes, Ph.D. Pablo Luna Nevárez, Ph.D. Abelardo Correa Calderón y Dr. Ulises Macías Cruz, por todas y cada una de sus aportaciones en mi formación académica y en la elaboración de éste documento, siempre serán fuente de inspiración y respeto para un servidor.

De manera muy especial quiero agradecer a la Doctora Noemí Torrentera, por su invaluable apoyo durante mi estancia en el Instituto de Ciencias Agrícolas, de verdad que me considero afortunado por contar con su amistad.

Quiero agradecer a mis amigos y compañeros de posgrado Ricardo Zamorano, Edgar Yocupicio, Ricardo Vicente, Ángel Mejía, Yolanda Osorio, Samanta Perard, Keila Valencia, Fabiola Guevara, Fidel Infante y muchos más (que por motivos de espacio no me es posible mencionar), ya que con todos y cada uno de ellos, compartí momentos que siempre estarán grabados en mi memoria. Por último, no podría faltar un agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al “Programa PROFAPI - ITSON, Convocatoria 2015 para Cuerpos Académicos”, por el apoyo económico brindado durante mi maestría así como por el financiamiento del proyecto de investigación, sin dichos apoyos, la realización de este trabajo hubiera sido imposible.

Gracias a todos por enseñarme que: **“Mi único trabajo en la vida, es alcanzar mis sueños”.**

## DEDICATORIAS

Este trabajo lo dedico especialmente a mi madre **Rosa Elvia Castro Valenzuela**, mis hermanos **Ana Laura, José Antonio, Dora Elena y María de la Luz (Lucero)**, mis sobrinos **Sebastián y Johana**, porque son ustedes el principal combustible que mueve mi motor.

A mi padre **José Sánchez Cuesta**, que aunque hace tiempo que te fuiste sé que te hubiera gustado poder leer estas líneas y éste documento producto del trabajo de tu hijo.

A mi pareja, **Arhemy Pineda Montes**, porque si hay alguien que día con día me brindado ánimos para superarme y a ser cada vez mejor persona y mejor profesionista, ¡eres tú!, sin todo tu apoyo la realización de este objetivo hubiera sido muchísimo muy complicada.

De manera muy especial a **Ph.D. Milton G. Thomas, Ph.D. Mark Enns, Ph.D. Scott Speidel** y todos sus alumnos de posgrado en el departamento de Ciencia Animal de la Universidad Estatal de Colorado (CSU), por su invaluable ayuda, enseñanzas, consejos y aportaciones a mi trabajo.

Por último, a todas las personas que de una u otra manera se involucraron en éste proyecto, ayudándome a poder llevarlo a término satisfactoriamente.

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	ii
<b>DEDICATORIAS</b> .....	iii
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	vi
<b>LISTA DE GRÁFICAS</b> .....	vii
<b>RESUMEN</b> .....	viii
<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	3
2.1 Importancia de la producción de leche a nivel nacional y regional .....	3
2.2 Factores que limitan la producción de leche .....	4
2.3 Estrés por calor y factores que influyen en su aparición .....	4
2.3.1 Factores ambientales implicados en la aparición del estrés por calor .....	5
2.3.2 Susceptibilidad genética al estrés por calor.....	7
2.4 Clasificación patológica del estrés por calor y formas de medirlo.....	9
2.4.1 Indicadores fisiológicos de estrés por calor .....	9
2.4.2 Indicadores medioambientales de estrés por calor .....	10
2.5 Estrategias para combatir los efectos negativos del estrés por calor.....	11
2.5.1 Manejo nutricional .....	11
2.5.1.1 Reajuste de las horas de servido de alimento .....	11
2.5.1.2 Cambios en la formulación de las dietas .....	12
2.5.2 Acondicionamiento ambiental.....	14
2.5.2.1 Sombras para ganado .....	14
2.5.2.2 Sistemas de enfriamiento para el ganado lechero.....	14
2.5.2.2.1 Sala de espera para la ordeña .....	15
2.5.2.2.2 Enfriamiento del pasillo de salida de la ordeña.....	16
2.5.2.2.3 Enfriamiento de comederos en corrales abiertos.....	16
2.5.3 Desarrollo genético de ganado menos susceptible al calor .....	17
2.6 Estrategias de mejoramiento genético implementadas en la búsqueda de ganado lechero termotolerante .....	17
2.6.1 Heterosis.....	18
2.6.2 Selección orientada a la termotolerancia en ganado lechero.....	19
2.6.3 Consideraciones para la selección de múltiples rasgos en ganado lechero .....	20

2.7 Métodos de clasificación de la habilidad termoregulatoria del ganado lechero.....	21
2.7.1 Coeficiente de tolerancia al calor .....	22
2.7.2 Estimación de la interacción Genotipo x Ambiente a través del modelo de norma de reacción .....	22
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>24</b>
3.1 Lugar de estudio.....	24
3.2 Unidades experimentales y condiciones de manejo .....	24
3.3 Colección de datos fenotípicos.....	25
3.4 Colección de datos climáticos .....	26
3.5 Caracterización de la respuesta termoregulatoria en las unidades experimentales .....	27
3.5.1 Estimación del Coeficiente de Tolerancia al Calor (HTC) .....	27
3.5.2 Estimación de la Interacción G x A mediante la aplicación el modelo de norma de reacción .....	28
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>32</b>
4.1 Distribución de partos y Condiciones ambientales .....	32
4.2 Indicadores fisiológicos (TR y FR) y productivos (PL).....	36
4.4 Nivel de tolerancia al estrés por calor determinado mediante el cálculo del coeficiente de tolerancia al calor .....	38
4.4 Nivel de tolerancia al estrés por calor determinado mediante la aplicación de modelos de norma de reacción .....	42
4.5 Heredabilidad para producción de leche bajo condiciones de estrés por calor .....	56
4.6 Clasificación de los toros de acuerdo a su potencial genético para producción de leche y para termotolerancia.....	57
<b>V. CONCLUSIÓN.....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>62</b>
<b>LITERATURA CITADA .....</b>	<b>63</b>

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1</b>	Ingredientes y composición química del concentrado comercial.....	24
<b>Cuadro 2</b>	Condiciones climáticas registradas diariamente durante el periodo de estudio.....	35
<b>Cuadro 3</b>	Promedios y errores estándar de indicadores fisiológicos de estrés por calor en ganado Holstein.....	37
<b>Cuadro 4</b>	Promedios y errores estándar de indicadores productivos en ganado Holstein.....	37
<b>Cuadro 5</b>	Clasificación del nivel de tolerancia al estrés por calor mediante el HTC.....	39
<b>Cuadro 6</b>	Resultados generales de los modelos de norma de reacción, HTC y PLA305 2011, PLA305 2012 y PLA305 2013 para las 100 vacas del estudio.....	52
<b>Cuadro 7</b>	Potencial genético para producción de leche, termotolerancia y clasificación de la repuesta termoregulatoria para los 29 toros del pedigrí.....	59
<b>Cuadro 8</b>	Pedigrí conformado por 100 vacas Holstein hijas de 29 toros y 83 vacas.....	62

## LISTA DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1</b>	Contribución económica de la producción de leche al producto interno bruto pecuario en 2013 en México.....	03
<b>Gráfica 2</b>	Tendencia genética para la producción de leche en ganado Holstein de E.U.A. en el periodo 1957-2013.....	07
<b>Gráfica 3</b>	Varianza genética para producción de leche (a), varianza genética para tolerancia al calor (fv) y suma total de varianzas (a+fv).....	20
<b>Gráfica 4</b>	Número de partos por mes y año de lactancia.....	32
<b>Gráfica 5</b>	Trayectoria del <b>ITH</b> durante el periodo 2010-2013 para la región del valle del Yaqui, Sonora, México.....	33
<b>Gráfica 6</b>	Cantidad de pesajes de leche de acuerdo al tipo de condición ambiental.....	44
<b>Gráfica 7</b>	Cantidad de registros productivos para cada punto en la escala del <b>ITH</b> .....	45
<b>Gráfica 8</b>	Tipos de respuesta termoregulatoria a las variaciones del <b>ITH</b> para las vacas del estudio.....	46
<b>Gráfica 9</b>	Animales tolerantes al estrés por calor.....	48
<b>Gráfica 10</b>	Animales robustos al estrés por calor.....	49
<b>Gráfica 11</b>	Animales sensibles al estrés por calor.....	49
<b>Gráfica 12</b>	Animales con tolerancia y susceptibilidad al estrés calórico más significativa.....	50
<b>Gráfica 13</b>	Heredabilidad para producción de leche a través de la trayectoria del <b>ITH</b> .....	56
<b>Gráfica 14</b>	Tipos de respuesta a las variaciones de los valores del <b>ITH</b> para cada toro del pedigrí.....	58

## RESUMEN

La capacidad de tolerar el calor ha comenzado a tomar una gran importancia dentro de las características deseables del ganado bovino, sin embargo, una de las principales problemáticas para su inclusión dentro de los objetivos de selección en los programas de mejoramiento genético, es que presenta un antagonismo con la capacidad genética de producción de leche, ocasionando complicaciones para encontrar un indicador fenotípico que permita una selección positiva para ambos caracteres. Recientemente, la estimación de la interacción entre el genotipo y el ambiente a través del uso de modelos de norma de reacción, ha sido propuesta como una alternativa para encontrar a los individuos con las respuestas fisiológicas y productivas más favorables ante condiciones ambientales hostiles. El objetivo del presente estudio fue caracterizar la respuesta termoregulatoria y productiva de ganado Holstein a través del uso de modelos de norma de reacción. Se utilizaron 4403 registros individuales de producción diaria de leche, pertenecientes a 3 lactancias consecutivas (2011, 2012 y 2013) de 100 vacas Holstein; dichos datos fueron emparejados con los índices de temperatura y humedad (ITH) de 3 días previos al pesaje de leche, para evaluar la plasticidad fenotípica de cada individuo dentro de la población. La utilización de modelos de norma de reacción hizo posible identificar a los animales que mostraron el mismo rendimiento productivo a lo largo de la trayectoria ITH (animales robustos), así como a aquellos con fluctuaciones en su rendimiento lechero (animales tolerantes y animales no tolerantes al estrés por calor). Los modelos de norma de reacción resultaron ser un buen indicador fenotípico de las habilidades productiva y termoregulatoria del ganado lechero.

**Palabras clave:** Termotolerancia, plasticidad fenotípica, modelos de norma de reacción, estrés por calor.

## ABSTRACT

Heat tolerance ability has started to take a great importance within the desirable characteristics in bovine cattle, however, a major problem of its inclusion within the objectives of selection in breeding programs, is that it has an antagonism with the genetic capacity to produce milk, causing complications to find a phenotypic indicator that enables a positive selection for both traits. Recently, the estimation of the genotype by environment interaction thru the use of reaction norm models has been proposed as an alternative to find animals with the best productive and physiological responses in a harsh environment. The objective of the present study was to characterize the thermoregulatory and productive responses of Holstein cattle thru the use of reaction norm models. A total of 4403 milk yield test-day records, belonging to three lactations (2011, 2012 and 2013) of 100 Holstein cows, were matched with the temperature and humidity index (THI) of 3 previous days in order to evaluate the phenotypic plasticity of each individual within the population. The use of reaction norm models allowed to identify animals that showed the same productive performance throughout the THI trajectory (robust animals), as well as those with varying productive performances (tolerant and sensitive animals to heat stress). The reaction norm models resulted in a good phenotypic indicator of the productive and thermoregulatory abilities of dairy cattle.

**Key words:** Thermotolerance, phenotypic plasticity, reaction norm models, heat stress.

## I. INTRODUCCIÓN

El ritmo de crecimiento de la población humana, unido al desarrollo económico y urbano, tiene repercusiones considerables en la producción pecuaria, en particular por medio de la creciente demanda de proteínas de origen animal (Horn, 2008). Dentro de los productos pecuarios más solicitados por los consumidores se encuentra la leche y sus derivados (FAO, 2009). Sin embargo, la constante selección orientada al aumento de la productividad lechera junto con el cambio climático generado por el calentamiento global, han propiciado que el ganado lechero actual tenga una mayor susceptibilidad al estrés por calor (Georges *et al.*, 1995; Bernabucci *et al.*, 2014). En este sentido, existen sitios productivos como el Valle del Yaqui (ubicado en el norte de México), que representan un enorme reto para el desempeño productivo del bovino lechero, puesto que sus condiciones climáticas durante el verano son lo suficientemente adversas para inducir la aparición del estrés por calor (Leyva-Corona *et al.*, 2008a).

El impacto económico del estrés por calor es sumamente negativo (St-Pierre *et al.*, 2003), puesto que provoca una fuerte reducción en la producción de leche mientras que a su vez también afecta significativamente el desempeño reproductivo y la salud del ganado (Fuquay, 1981; Hansen *et al.*, 2001). Ante esto, diversas áreas del conocimiento en ciencia animal han logrado desarrollar estrategias para combatir los efectos del estrés calórico en bovinos lecheros. Una es el manejo nutricional (Beede y Collier, 1986; Valtorta *et al.*, 1996; West, 2003), otra es la implementación de sistemas de enfriamiento (Armstrong, 1994); y por último, el desarrollo de líneas genéticas adaptadas a condiciones climáticas extremas (Dikmen *et al.*, 2013).

Las nuevas estimaciones entre las interacciones genéticas y medio ambientales soportan el uso de herramientas biotecnológicas recientemente disponibles para identificar

la base genética de la susceptibilidad o la tolerancia al estrés por calor (Collier *et al.*, 2006). La capacidad de tolerar el calor, comúnmente referida como termotolerancia, ha comenzado a tomar una gran importancia dentro de las características deseables en el ganado a nivel mundial (McManus *et al.*, 2009), considerando que cerca del 60% de la población bovina en el planeta es afectada por este problema (Wolfenson *et al.*, 2000). Sin embargo, una de las principales problemáticas para su inclusión dentro de los objetivos de selección en los programas de mejoramiento genético es, que presenta un marcado antagonismo con la capacidad genética de producción de leche en el ganado (Santana *et al.*, 2015), ocasionando complicaciones para encontrar un indicador fenotípico que permita una selección positiva para ambos caracteres. Resulta entonces primordial lograr implementar metodologías que permitan estimar de manera precisa el grado de tolerancia al calor de cada individuo, con la finalidad de caracterizar correctamente las diferencias fenotípicas existentes entre individuos y sentar las bases necesarias para el desarrollo de estudios genéticos que resulten útiles para fines de selección. Recientemente, la estimación de la interacción entre el genotipo y el ambiente a través del uso de modelos de norma de reacción ha sido propuesta como una alternativa para encontrar pequeños rumiantes con las respuestas fisiológicas y productivas más favorables ante condiciones ambientales hostiles (Menedez-Buxadera *et al.*, 2013; Menedez-Buxadera *et al.*, 2014), sin embargo, no existen reportes del uso de esta metodología en ganado Holstein.

Ante este escenario, el objetivo del presente estudio fue caracterizar las respuestas termoregulatoria y productiva de ganado Holstein sometido a condiciones de estrés por calor a través del uso de modelos de norma de reacción.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Importancia de la producción de leche a nivel nacional y regional

En México, la producción de leche representa una de las actividades económicas de mayor importancia en cuanto al valor total de la producción pecuaria nacional. Según datos publicados en el resumen del 2014 por parte del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2014a), en el 2013 la producción de leche ocupó el tercer lugar del producto interno bruto (PIB) pecuario con un 18.98% de la producción total, lo cual fue equivalente a \$61'406,110 (**Gráfica 1**).



**Gráfica 1.** Contribución económica de la producción de leche al producto interno bruto pecuario en el año 2013 en México (Millones de pesos).

En el estado de Sonora, la producción intensiva de ganado lechero (18, 711 cabezas) generó alrededor de 108'112,000 L en el año 2014 (SIAP, 2014b). Esto indica que la producción diaria promedio de dicho año fue de 296,197 L; por otra parte, según datos de la Comisión Nacional de Población (CONAPO, 2014), la población humana en Sonora para el mismo año fue de 2'892,464 habitantes, por lo que considerando que el consumo per cápita

de leche a nivel nacional es de 109.4 L (SAGARPA, 2014), la producción lechera de Sonora presenta un déficit de leche de aproximadamente 72 L con respecto a sus habitantes.

## **2.2 Factores que limitan la producción de leche**

Existen muchos factores que afectan la producción dentro de la ganadería lechera, entre ellos pueden mencionarse: incidencia de enfermedades, disponibilidad y calidad del alimento para el ganado, costo de los insumos, tecnología disponible, manejo zootécnico y el clima; éste último, de acuerdo a lo expuesto por Renaudeau *et al.* (2012), es uno de los factores cruciales que limitan el desarrollo de la producción animal en las regiones cálidas. El valle del Yaqui, Sonora, se caracteriza por ser una zona semiárida cuyas condiciones de verano combinan alta temperatura ambiental con alto porcentaje de humedad relativa, situación que compromete los mecanismos de enfriamiento evaporativo de los bovinos lecheros y provoca grados de estrés por calor más severos (Bouraoui *et al.*, 2002; West, 2003; Ruíz *et al.*, 2005). Estudios realizados con información climática local confirman que las condiciones ambientales del valle del Yaqui (Temperatura Ambiental=48°C, Índice de Temperatura - Humedad=85 unidades durante el verano) son lo suficientemente adversas para inducir la aparición del estrés por calor y disminuir la producción de la vaca lechera (Leyva-Corona *et al.*, 2008a; Leyva-Corona *et al.*, 2008b; Rivera-Acuña *et al.*, 2015).

## **2.3 Estrés por calor y factores que influyen en su aparición**

El estrés por calor puede definirse como cualquier combinación de condiciones ambientales que puedan provocar que la temperatura de la zona termoneutral de los animales sea superada y ocurra la hipertermia (Ghosal y Matur, 1992; Mousa y Elkalifa, 1992; Silanikove, 1992). El ganado lechero contemporáneo posee una mayor susceptibilidad a padecer estrés por calor debido a que, por una parte, históricamente ha sido sujeto de una selección orientada únicamente hacia el incremento de su habilidad

productiva (Georges *et al.*, 1995); y por otra parte, cada año tiene que enfrentarse a un entorno cada vez más hostil, producido por el cambio climático generado por el calentamiento global (Bernabucci *et al.*, 2014).

### **2.3.1 Factores ambientales implicados en la aparición del estrés por calor**

En términos generales, se pueden mencionar cuatro factores climáticos que influyen efectivamente para la presentación del estrés por calor: la temperatura ambiental, la humedad relativa, la velocidad del aire y la radiación solar (Finch, 1984). La temperatura del aire es generalmente la principal fuerza motriz para el intercambio de calor entre el animal y su entorno, ya que al existir una diferencia de temperatura entre ambos, se produce un intercambio calórico regido por leyes físicas cuya finalidad es igualar las temperaturas (Precht *et al.*, 1973). Algunos de los principales mecanismos no evaporativos de disipación de calor del organismo animal son la conducción, la convección y la radiación, todos ellos dependen del gradiente térmico que existe entre el cuerpo y el medio ambiente que lo rodea, lo cual se traduce en que son funcionales únicamente cuando la temperatura corporal es mayor que la ambiental, dado que el intercambio de calor siempre ocurre de donde hay más hacia donde hay menos calor (Khalifa, 2003; Collier *et al.*, 2006).

Cuando la temperatura del aire aumenta por encima de la corporal, la efectividad de los mecanismos de disipación de calor que dependen del gradiente térmico es seriamente afectada, por lo que es necesario que el animal utilice otras vías de intercambio calórico, como la sudoración y el jadeo, mismas que no dependen principalmente del gradiente térmico sino del gradiente de saturación de vapor de agua en el aire (porcentaje de humedad relativa; Cony *et al.*, 2004). En condiciones de altas temperaturas ambientales, el porcentaje de humedad relativa juega un papel crucial en cuanto a la facilidad con la cual un bovino disipa el exceso de calor contenido en su cuerpo. Por una parte, cuando el porcentaje de

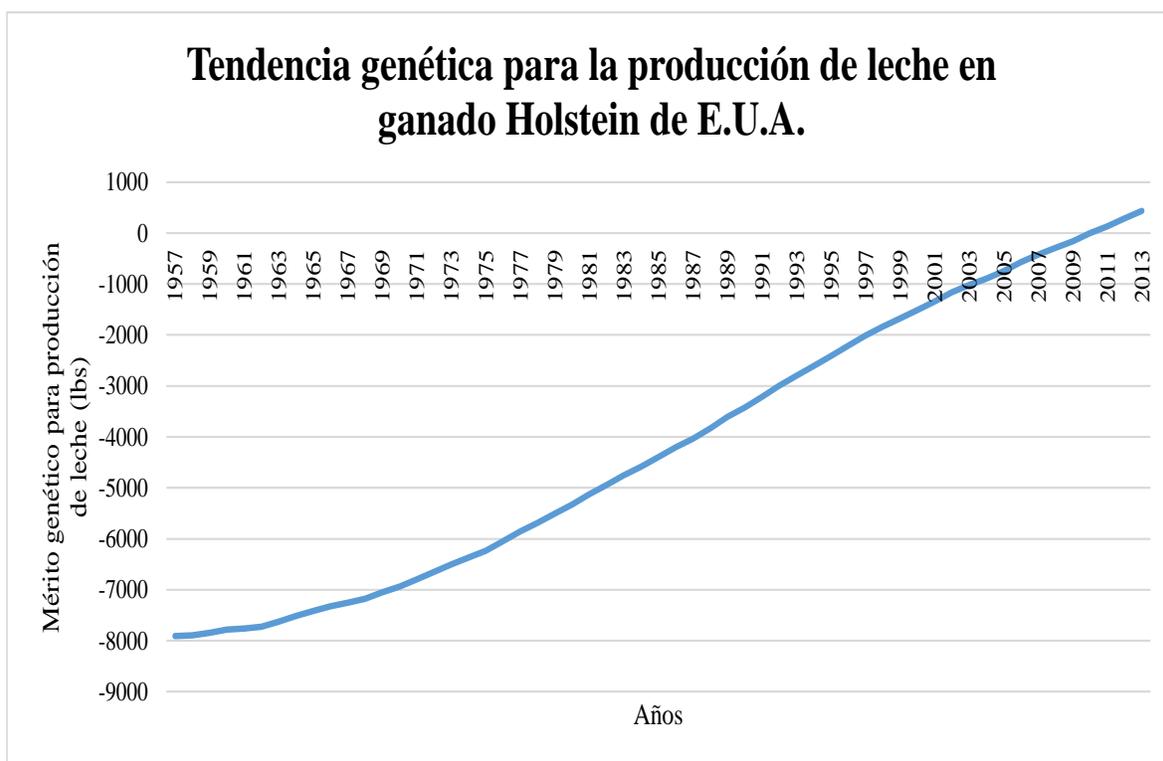
humedad en el aire es bajo, el bovino puede enfriar su cuerpo mediante la evaporación del calor a través del sudor y la saliva (jadeo); sin embargo, cuando el porcentaje de humedad es elevado, la tasa de evaporación de calor por sudoración y jadeo se reduce considerablemente, dificultando la disipación del exceso de calor contenido en el cuerpo; es por eso que sitios cuyas condiciones climáticas se caracterizan por ser cálidas y húmedas representan un entorno ambiental mucho más estresante para el animal (West, 1994; Bouraoui *et al.*, 2002; Pereira *et al.*, 2014).

Además de los efectos provocados por la temperatura ambiental y la humedad relativa, otro factor ambiental que también influye en la aparición del estrés por calor en los bovinos es el movimiento del aire. La presencia de viento con baja velocidad durante las épocas cálidas del año favorece el incremento en la ganancia de calor por parte del animal, mientras que por el contrario, si la velocidad del viento es alta, resultan favorecidos los procesos de disipación de calor por vías evaporativas; a menos que se encuentren comprometidas con un alto porcentaje de humedad relativa en el ambiente (Mader *et al.*, 1997; Mader *et al.*, 2006).

Por último, otro elemento de suma importancia que influye notablemente en la ocurrencia del estrés por calor es la radiación solar, debido a que cuando el ganado no cuenta con elementos de protección contra ella (sombras naturales o artificiales), el calor generado por ésta se suma al calor de los procesos metabólicos y el de los factores ambientales previamente descritos, aumentando la cantidad de energía calórica que debe ser disipada para lograr mantener la temperatura corporal en un rango fisiológico normal (Da Silva, 2006; Schütz *et al.*, 2010.).

### 2.3.2 Susceptibilidad genética al estrés por calor

El ganado lechero de la raza Holstein ha sido históricamente seleccionado para aumentar su habilidad productiva, por lo que de manera general, a pesar de que la producción de leche es un rasgo de origen poligénico, algunos de los *loci* (conjunto de posiciones específicas dentro del genoma) con mayores efectos sobre dicho carácter han llegado a fijarse o están cerca de hacerlo (Georges *et al.*, 1995). Lo anterior concuerda con los datos publicados en el 2015 por el Consejo de Criadores de Ganado Lechero de los Estados Unidos de América (CDCB, por sus siglas en inglés), en los que se muestra que el mérito genético para producción de leche en esta raza ha tenido un incremento constante a partir de 1957 (Gráfica 2).



**Gráfica 2.** Tendencia genética para la producción de leche en ganado Holstein de E.U.A. en el periodo 1957-2013 (Fuente: Council on Dairy Cattle Breeding, 2015).

El aumento de la capacidad productiva del ganado Holstein es un resultado positivo considerando que dicho rasgo es el que buscaba mejorarse, sin embargo, a medida que la selección se orientó solo a los rasgos productivos, se deterioró la capacidad de los animales para adaptarse al ambiente que los rodea (Oltenu y Broom, 2010). En el caso específico del ganado lechero, ocurrió una afectación en distintos rasgos de importancia económica entre los cuales se encuentra la habilidad termoregulatoria, misma que resultó seriamente afectada debido a que con el aumento capacidad productiva también aumentó la generación de calor metabólico, provocando que el bovino lechero actual posea una mayor sensibilidad a las condiciones climáticas cálidas (Zimelman *et al.*, 2011; Bernabucci *et al.*, 2014). Existe evidencia sólida del antagonismo entre la capacidad de producción de leche y la habilidad para mantener la temperatura rectal en el rango fisiológico normal. Ravagnolo y Misztal (2000) reportaron una correlación negativa de -0.3 en ganado Holstein de los Estados Unidos de América. Bernabucci *et al.* (2014) indicaron correlaciones negativas en un rango de -0.24 a -0.56 en ganado Holstein italiano; por su parte Santana *et al.* (2015) señalaron una correlación negativa de -0.23 para ganado Gyr en Brasil. Para explicar el fenómeno anterior, surgió la teoría de asignación de recursos, dicha teoría explica que los recursos energéticos de un animal son limitados y como resultado ello, si por cualquier motivo la demanda energética de un proceso biológico se incrementa (como por ejemplo la producción de leche), otras funciones tales como la fertilidad, el mantenimiento, el movimiento, la defensa inmune o la termorregulación resultarán afectadas (Goddard y Beilharz, 1977; Beilharz *et al.*, 1993). El problema clave es que el incremento en productividad en los animales podría conducir a que éstos dirijan la mayor parte de sus recursos energéticos a satisfacer las demandas productivas y descuiden aquellos necesarios para poder frente a los factores estresantes (Rauw *et al.*, 1998; Rauw, 2008).

## **2.4 Clasificación patológica del estrés por calor y formas de medirlo**

De acuerdo a lo expuesto por Enns *et al.* (2011), existen tres categorías de enfermedades en el ganado. La primera agrupa las condiciones patológicas producidas por defectos en la composición genética de los individuos, por ejemplo: la osteopetrosis, la artrogriposis múltiple o la hemimelia tibial. La segunda es la que contiene a todas las enfermedades producidas por la acción de cualquier agente etiológico como bacterias, virus u hongos; mientras que la tercera, es aquella en la que se ubican las condiciones patológicas que se encuentran asociadas con retos ambientales no transmisibles, como por ejemplo el mal de altura o el estrés por calor. Debido a lo anterior, es comprensible que para medir los impactos del estrés por calor existan tanto indicadores fisiológicos (propios del animal) como ambientales (dependientes del clima).

### **2.4.1 Indicadores fisiológicos de estrés por calor**

Cuando el ganado se enfrenta a hostilidades climáticas que le provocan estrés por calor, ocurren una serie de respuestas fisiológicas y conductuales que tienen como objetivo mantener condiciones de homeotermia en el organismo. Dentro de las principales respuestas fisiológicas ante el estrés por calor se encuentran: aumentos en la temperatura rectal (TR), frecuencia respiratoria (FR) y gasto cardíaco (GC) (Bohmanova *et al.*, 2007; Bouraoui *et al.*, 2002; Ingraham *et al.*, 1974). También ocurren una disminución del consumo de materia seca así como del tiempo de rumia (Rhoads *et al.*, 2009; West, 2003) y modificaciones en la circulación sanguínea (vasodilatación periférica) que favorecen la pérdida de calor por conducción, convección y radiación. Estos ajustes fisiológicos provocan una serie de alteraciones metabólicas que se reflejan en cambios hormonales que contribuyen a la aclimatación de los animales a las condiciones adversas (Choshniak *et al.*, 1982; Collier *et al.*, 2008; Srikandakumar y Johnson, 2004), sin embargo, de manera

general también traen como consecuencia una marcada disminución de la producción de leche y de la eficiencia reproductiva del animal (West, 2003).

Por otra parte, las principales respuestas conductuales observadas en los bovinos bajo condiciones de estrés calórico son la restricción del movimiento general (Du Preez *et al.*, 1990; Hubbard *et al.*, 1999; Schütz *et al.*, 2009), la búsqueda de sombras (dispersándose en la medida de lo posible dentro de ellas) y la adopción de posturas específicas que faciliten las pérdidas de calor por mecanismos no evaporativos (decúbito en áreas frescas cuando las hay disponibles, o por el contrario, permanecer de pie cuando no las hay para aumentar la superficie de contacto con el viento) (Beede y Collier, 1986; Hansen, 2004; Arias, 2008).

#### **2.4.2 Indicadores ambientales de estrés por calor**

Diversos indicadores que combinan diferentes factores climáticos han sido propuestos para medir el impacto del estrés por calor en el ganado, sin embargo, la utilidad de cada uno depende de la disponibilidad pública de la información meteorológica (Bohmanova *et al.*, 2007). La mayoría de los estudios relacionados con el estrés por calor utilizan un indicador que deriva de la información que usualmente puede ser obtenida con mayor facilidad por los investigadores. Este indicador es el Índice de Temperatura - Humedad (ITH), el cual combina a través de una fórmula datos climáticos de temperatura y humedad relativa. Originalmente fue propuesto como “índice de malestar” (The Discomfort Index) por Thom, (1959), pero posteriormente fue modificado por diversos autores (Buffington *et al.*, 1981; Hahn, 1999; Mader, 2006).

A pesar de que el ITH no es obtenido utilizando información propia del ganado, diversos estudios han demostrado su utilidad en la estimación del grado de estrés por calor al establecer las relaciones existentes entre éste y diversas respuestas fisiológicas y de

comportamiento que ocurren cuando el ITH sobrepasa las 72 unidades, en el caso de ganado lechero (Armstrong, 1994; Hubbard *et al.*, 1999; Bouraoui *et al.*, 2002).

## **2.5 Estrategias para combatir los efectos negativos del estrés por calor**

En general han sido sugeridas tres alternativas para contrarrestar los efectos negativos del estrés por calor en los bovinos lecheros: el manejo nutricional, el acondicionamiento ambiental y el desarrollo genético de ganado menos susceptible al calor (Beede y Collier, 1986; West, 2003).

### **2.5.1 Manejo nutricional**

La disponibilidad de nutrientes para utilizar con fines productivos por parte del ganado lechero depende tanto del consumo y la digestión del alimento, como de la absorción de dichos nutrientes por parte del tracto digestivo; sin embargo, todos estos procesos resultan directamente afectados por la presencia del estrés por calor (Beede y Collier, 1986). Cuando las condiciones climáticas sobrepasan los límites de la zona de confort térmico del ganado, ocurre una severa reducción en el consumo de materia seca, lo cual se traduce en una notable reducción del desempeño productivo por parte de los animales (Fuquay, 1981; West, 1999; Rhoads *et al.*, 2009). Ante esto, diversas estrategias han sido investigadas con la finalidad de combatir dicha problemática.

#### **2.5.1.1 Reajuste de las horas de servido de alimento**

Ofrecer el alimento en las horas más frescas del día permite estimular con mayor facilidad el consumo del mismo por parte del ganado, lo que, también contribuye a evitar que la carga calórica producida como consecuencia del metabolismo ruminal (que dependiendo el tipo de alimento ofrecido suele ocurrir 4 horas después de la ingesta) se presente durante los horarios más cálidas del día (Van Soest, 1994). Brosh *et al.* (1998) indicaron que la hora de servido de alimento se relacionó con cambios observados en la TR,

la FR y el GC de vaquillas Hereford en crecimiento (12 meses de edad,  $345 \pm 10$  kg/peso vivo), en dicho estudio, al ofrecer el alimento por la mañana al ganado, ocurrió un aumento de la producción de calor metabólico en los animales durante el final de la mañana y el inicio de la tarde, misma que se sumó al aumento de la carga calórica provocado por la gran cantidad de radiación solar presente en el mismo momento del día; trayendo como consecuencia un aumento de las constantes fisiológicas ya mencionadas; por el contrario, cuando se ofreció el alimento por la tarde pudo evitarse el aumento de las constantes debido a que el aumento de la producción de calor metabólico no se empalmó con periodos de alta radiación solar. Los efectos positivos del cambio de horario en el servido de alimento sobre la disipación la carga calórica generada por el metabolismo animal, derivan de que los animales pueden realizar la disipación por mecanismos no evaporativos más fácilmente cuando las condiciones ambientales le resultan más favorables (West, 1999).

#### **2.5.1.2 Cambios en la formulación de las dietas**

Uno de los mayores desafíos de la nutrición de rumiantes bajo condiciones de estrés por calor es encontrar el punto en el que se logre mantener el consumo de nutrientes necesarios para soportar el nivel productivo deseado, sin dejar de considerar la eficiencia económica y la capacidad termogénica de la dieta (Fuquay, 1981; West, 1999). Como una alternativa para contrarrestar el efecto de la disminución del consumo de alimento (medido como la disminución en el consumo de materia seca) durante periodos de estrés por calor, la densidad energética de las dietas durante los meses de verano a menudo ha sido aumentada mediante la inclusión de granos y grasas suplementarias, sin embargo, este tipo de modificaciones deben llevarse a cabo con mucho cuidado puesto que si se sobrepasan los límites de adición de estos ingredientes, se puede conducir al animal a estados patológicos como acidosis ruminal o la disminución de la capacidad digestiva de las fibras

(Shwartz *et al.*, 2009). Una práctica común durante condiciones propicias al estrés por calor, es el incrementar en el uso de concentrados en las dietas. Coppock (1985) señala que el máximo beneficio a partir del uso concentrado parece ocurrir al implementar un 40% de forraje con un 60% de concentrado. Además de lo anterior, también es importante considerar la inclusión de minerales como el  $K^+$  y el  $Na^+$  en el alimento del ganado que produce bajo condiciones ambientales cálidas, puesto que son electrolitos claves en el mantenimiento del equilibrio ácido-base, y en el caso específico del  $K^+$ , resulta ser el principal catión que el bovino pierde a través del sudor, mismo que representa uno de los mecanismos de disipación de calor más importantes del bovino (Jenkinson y Mabon, 1973; West, 1999; Kadzere *et al.*, 2002). El uso de antioxidantes en las dietas formuladas para ganado que habita en zonas cálidas también es importante, puesto que el estrés por calor se encuentra asociado con una reducida actividad antioxidante total del plasma sanguíneo en el ganado, misma que repercute en el aumento de la producción de radicales libres provocando afectaciones a la supervivencia embrionaria en vacas expuestas a altas temperaturas (Ealy *et al.*, 1992; Harmon *et al.*, 1997). Aréchiga *et al.*, (1998) señalaron que el uso prolongado de  $\beta$ -caroteno ( $\geq 90$  d) tuvo un efecto benéfico en la fertilidad de ganado lechero al aumentar el porcentaje de preñez en vacas alimentadas con raciones suplementadas con 400 mg/d de dicho antioxidante, en comparación con vacas alimentadas con dietas control (35.4 vs. 21.1 %, respectivamente).

Existe evidencia de que la reducción en el consumo de materia seca tiene un impacto negativo en la producción de leche (Wayman *et al.*, 1962; Fuquay, 1981; West, 2003), sin embargo, recientes investigaciones señalan que la ingesta reducida de nutrientes representa solo el 35% de las pérdidas productivas, mientras que el resto es consecuencia de factores distintos al bajo consumo (Rhoads *et al.*, 2009).

## **2.5.2 Acondicionamiento ambiental**

El acondicionamiento ambiental también llamado mejoramiento físico del ambiente, tiene como fundamento reducir la hostilidad de las condiciones climáticas mediante la modificación del entorno que rodea al animal. La adecuación de las instalaciones en las que permanece y se maneja el ganado permite disminuir significativamente el grado de estrés térmico en los animales (Ajeet y Meena, 2011).

### **2.5.2.1 Sombras para ganado**

La instalación de sombras para el ganado es una de las modificaciones ambientales más simples, económicas y de rápidos resultados en la disminución los efectos negativos del estrés por calor (Beede y Collier, 1986; West, 2003). Se estima que entre 30-50% de la carga total de calor puede ser disminuida mediante la instalación de sombra adecuadas, de tal manera que el ganado con acceso a la misma presenta mejores parámetros productivos y reproductivos, así como también menores tasas respiratorias y temperaturas rectales (Collier *et al.*, 2006). La efectividad de las sombras depende en gran medida de la capacidad que tienen los materiales utilizados en su construcción para bloquear la radiación solar, así como también de la altura, orientación y sobre todo, la disponibilidad de sombra (en m<sup>2</sup>) por animal (Tucker *et al.*, 2008; Schütz *et al.*, 2010; Renaudeau *et al.*, 2012). Aunque las sombras proveen una gran ayuda al ganado, por sí solas no tienen la capacidad de alterar la temperatura del aire ni la humedad relativa del ambiente, lo cual significa que su uso sin ninguna otra adecuación ambiental puede resultar insuficiente para contrarrestar los efectos estrés por calor (Armstrong, 1994; West, 2003).

### **2.5.2.2 Sistemas de enfriamiento para el ganado lechero**

Los sistemas de enfriamiento para el ganado lechero fueron evaluados en principio por Seath y Miller (1948), y consisten básicamente en la utilización alternada de agua

mediante aspersores de alta o baja presión y ventilación forzada. Con el paso de los años, distintos sistemas de enfriamiento así como su efectividad en el alivio del estrés por calor han sido estudiados bajo diferentes condiciones climáticas en varias razas y estados fisiológicos de ganado lechero (Ryan *et al.*, 1992; Keister *et al.*, 2002; Correa-Calderón *et al.*, 2004; Avendaño-Reyes *et al.*, 2006). Dependiendo de cuál sea el diseño de las instalaciones en un establo lechero (corrales abiertos, echaderos individuales, etc.), existen sitios claves dentro de los cuales la implementación de sistemas de enfriamiento tiene repercusiones claves en la disminución de los impactos del estrés por calor. El diseño más comúnmente utilizado en el Valle del Yaqui es el de corrales abiertos con pisos de tierra, por lo que se enfatizará en secciones de este tipo de establo lechero donde resulta importante la instalación del sistema de enfriamiento.

#### **2.5.2.2.1 Sala de espera para la ordeña**

La sala de espera previa a la ordeña representa un sitio crítico en cuanto al grado de estrés por calor que puede llegar a padecer el ganado, ya que dependiendo de la cantidad de animales y las rutinas de manejo específicas de cada establo, las vacas pueden ser retenidas entre 15 y 75 minutos dos a tres veces al día dentro de la sala de espera (Armstrong, 1994; Collier *et al.*, 2006). Cuando estas instalaciones carecen de ventilación, provocan que la carga calórica de los animales se concentre en esta área agravando los niveles de estrés térmico. Ante esto, la programación del uso de aspersores y abanicos en la sala de espera dependiendo de las condiciones de temperatura y humedad ambiental, han mostrado influir positivamente en el desempeño del ganado lechero al aumentar la producción de leche aproximadamente 1 kg/vaca/día en condiciones de humedad alta (Strickland *et al.*, 1989; Leyva-Corona *et al.*, 2012).

#### **2.5.2.2.2 Enfriamiento del pasillo de salida de la ordeña**

Después del ordeño, es posible prolongar entre 15-30 min extras el periodo de enfriamiento del ganado mediante la implementación de aspersores que humedezcan su pelo de forma automática cuando atraviesan el pasillo de salida de la ordeña (Armstrong, 2000). Con este sistema, cuando los animales salen de la ordeña continúan disipando su calor mientras la humedad del pelo termina de evaporarse, situación que se traduce en un mayor porcentaje de animales que al regresar a su corral se dirigen a comer (Smith *et al.*, 1999).

#### **2.5.2.2.3 Enfriamiento de comederos en corrales abiertos**

El enfriamiento del área del comedero mediante periodos cortos de agua (1-2 minutos), seguidos de periodos más prolongados de ventilación forzada (13-15 minutos), ha mostrado impactar positivamente en el ganado lechero al mejorar parámetros productivos y reproductivos, mientras que disminuye el incremento por encima de rangos fisiológicos normales de temperatura rectal y frecuencia respiratoria (Schultz, 1988). La utilidad de este tipo de sistemas se ve afectada por factores como la velocidad y dirección del viento en la zona, así como también el tipo de suelo en el área de comedero, ambos factores pueden resultar en la ineffectividad del enfriamiento al evitar que ocurra un correcto humedecimiento de la piel del animal o favoreciendo el encharcamiento de agua en la zona (Smith *et al.*, 1999).

El uso de sistemas de enfriamiento reduce de manera importante los efectos negativos del estrés por calor en el ganado lechero, sin embargo, aún en establos con sistemas de enfriamiento instalados y con buenas prácticas de manejo, se ha reportado que el estrés por calor disminuye el consumo de alimento y la producción de leche entre un 10 y 15% (Beede y Collier, 1986; Armstrong, 1994; West, 2003). Tomando en cuenta dicho antecedente, junto con los reportes sobre el aumento gradual de la temperatura en la

superficie de la tierra en los próximos años por parte del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (del inglés “IPCC”) en 2007, resulta evidente que además de realizar modificaciones en las instalaciones y realizar ajustes en las dietas durante las épocas críticas del año, es necesario desarrollar líneas de ganado lechero que presenten una mayor tolerancia a los embates del clima.

### **2.5.3 Desarrollo genético de ganado menos susceptible al calor**

El desarrollo de individuos que de acuerdo a su composición genética posean un mejor desempeño productivo a la par de una menor susceptibilidad al estrés por calor, representa quizás la estrategia de mejoramiento animal más rentable para la ganadería que se desarrolla en las zonas con climas cálidos (Gaughan *et al.*, 2009; Renaudeau *et al.*, 2012; Dikmen *et al.*, 2013). Algunos estudios reportan variaciones en la susceptibilidad al estrés por calor, tanto entre razas como entre individuos de la misma raza, lo cual se traduce en el mejor desempeño productivo de algunos animales sobre otros aún bajo condiciones ambientales desfavorables (Finch, 1986; Hansen *et al.*, 2001; Renaudeau *et al.*, 2012). Dicha premisa abre paso a la posibilidad de implementar estrategias de mejoramiento genético que permitan desarrollar ganado lechero termotolerante.

## **2.6 Estrategias de mejoramiento genético implementadas en la búsqueda de ganado lechero termotolerante**

La mejora genética de la tolerancia al calor ha sido un tema de investigación desde hace varias décadas (Seath, 1947). La habilidad termoregulatoria en el ganado es un rasgo que puede heredarse a través de características como la capacidad de sudoración, la resistencia al flujo calórico por parte de los tejidos y el tamaño y la forma del pelaje (Finch, 1986; West, 2003). Ravagnolo y Misztal (2002) mencionan que las principales estrategias de mejoramiento genético utilizadas para incrementar la capacidad termoregulatoria del

ganado lechero han sido la heterosis y la selección de ejemplares dentro de la misma raza con mayor tolerancia al calor.

### **2.6.1 Heterosis**

Como resultado de su proceso evolutivo, el ganado cebú (*Bos indicus*) desarrolló adaptaciones genéticas que le permiten tener una mayor termotolerancia al poseer mecanismos de disipación de calor más eficientes y tasas metabólicas considerablemente menores a las del ganado europeo (*Bos taurus*) (Hansen, 2004). A raíz de lo anterior, la posibilidad de obtener beneficios en cuanto a la tolerancia al estrés por calor mediante la realización de cruzamientos entre dichas subespecies bovinas se ha investigado desde la década de 1950 (Johnston *et al.*, 1958). En términos generales, es posible notar que el mestizaje de razas lecheras de alto rendimiento, como la Holstein, con razas cebuínas adaptadas al clima, tiene como resultado inmediato una mejoría en la habilidad de la progenie para tolerar el calor, pero una dramática reducción de su capacidad productiva (McDowell *et al.*, 1996). Ante esto, algunos autores han señalado que la mejor alternativa para sacar provecho del vigor híbrido sería incorporar en las razas europeas específicamente los genes relacionados con la termotolerancia, evitando aquellos genes indeseables (responsables de la ineficiencia productiva) de las razas cebú (Hansen, 2004; Hayes *et al.*, 2013). Dicha sugerencia cobró importancia dado que aunque la respuesta al estrés por calor es un rasgo de carácter poligénico (Cammack *et al.*, 2009), en el ganado bovino existe evidencia de que un gen en particular es capaz de mejorar considerablemente la habilidad termoregulatoria de los animales. Dicho gen, conocido como “slick-hair gene”, es responsable de conferir al ganado una capa de cabello más corto y liso que favorece en gran medida la disipación de calor (Olson *et al.*, 2003). Descrito por primera vez en ganado Senepol de las Islas Vírgenes, el “slick-hair gene” también ha sido identificado en ganado

Carora de Venezuela e introducido mediante cruzamientos absorbentes de ganado Holstein con ganado Senepol a los Estados Unidos, mostrando aportar significativas mejorías en cuanto a su capacidad productiva y termoregulatoria bajo condiciones de estrés por calor (Olson *et al.*, 2003; Dikmen *et al.*, 2008; Dikmen *et al.*, 2014).

Los resultados de la heterosis en el desarrollo de individuos termotolerantes muestran resultados muy favorables en la actualidad, sin embargo, es importante destacar que los cruzamientos iniciales entre ganado Senepol y Holstein fueron en el año de 1990, es decir, hace 25 años atrás (Dikmen *et al.*, 2014); esto permite entender que aún y cuando ha sido posible mejorar la respuesta ante el estrés por calor mediante esta metodología, el periodo de tiempo para hacerlo ha sido muy prolongado.

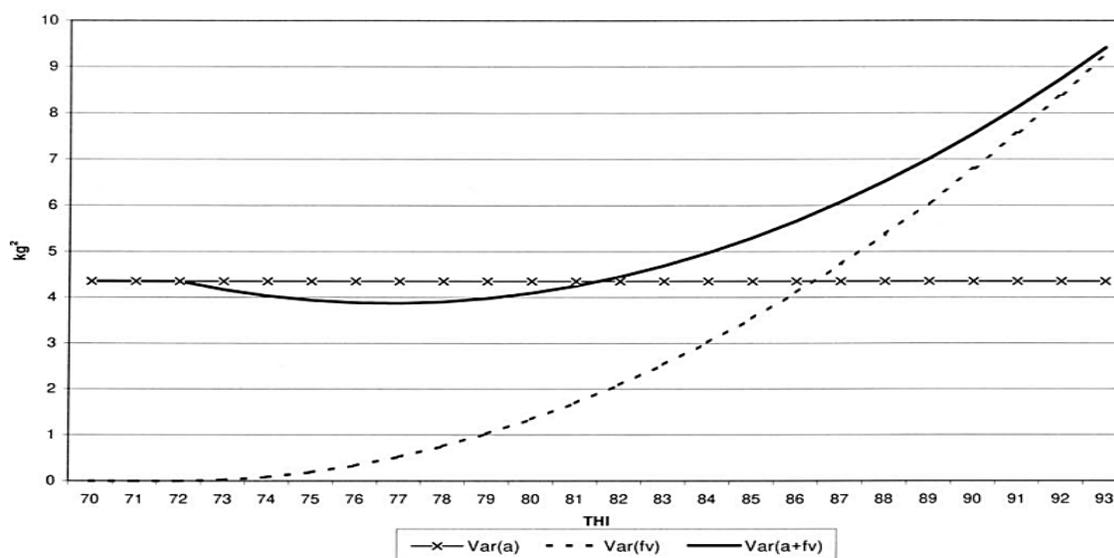
### **2.6.2 Selección orientada a la termotolerancia en ganado lechero**

Estudios en ganado lechero han reportado diferencias importantes en la capacidad termoregulatoria de animales dentro de la misma raza al estudiar el efecto del estrés por calor evaluando tasa respiratoria, temperatura corporal y producción de leche (Seath, 1947; Gómes da Silva, 1973). En este contexto, las estimaciones de la heredabilidad en cuanto a la tolerancia al calor han mostrado resultados moderados que oscilan entre 0.15 y 0.31, lo cual se traduce en la factibilidad de realizar mejorías en la habilidad termoregulatoria a través de la selección de individuos con mejor capacidad de controlar su temperatura corporal (Dikmen *et al.*, 2012). La temperatura corporal del ganado normalmente se mide por medio de la temperatura rectal, sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que la correlación genética entre ésta y la producción de leche es negativa, de tal manera que seleccionar animales basándose en mejores respuestas de temperatura rectal, podría conducir a una selección en contra de la productividad de leche a

menos que se logre identificar a los genes que contribuyen a regular la temperatura sin afectar adversamente la capacidad productiva (Dikmen *et al.*, 2012; Hansen, 2013).

### 2.6.3 Consideraciones para la selección de múltiples rasgos en ganado lechero

La realización de una selección combinada para la producción de leche y la tolerancia al calor no resulta tan sencilla tomando en cuenta que los animales que tienen mayor capacidad productiva son los que de manera general resultan más afectados por el estrés calórico (García, 2004; Zimbelman *et al.*, 2011; Hansen, 2013). Ravagnolo y Misztal (2000) realizaron un estudio específico sobre la selección combinada para dichos caracteres y llegaron a la conclusión de que cuando el ganado se encuentra bajo condiciones de estrés por calor, la variación genética para la tolerancia al calor puede ser tan grande como la variación genética para la producción de leche (Gráfica 3). De igual manera, los mismos autores señalaron que aunque la correlación entre ambos rasgos es negativa, es posible realizar una selección combinada para producción de leche y tolerancia al calor debido a que el valor de la correlación es pequeño (alrededor de -0.3).



**Gráfica 3.** Varianza genética para producción de leche (a), varianza genética para tolerancia al calor (fv) y suma total de varianzas (a+fv) (Adaptado de Ravagnolo y Misztal, 2000).

La existencia de variabilidad genética en la susceptibilidad al estrés por calor hace posible identificar individuos dentro de un grupo élite (por ejemplo, vacas de raza Holstein) con una respuesta sólida o estable ante distintos escenarios climáticos (valores de ITH), por lo que a su vez, también permite identificar a los individuos con mayor sensibilidad a las variaciones ambientales (Menéndez-Buxadera *et al.*, 2014). Estos resultados son consecuencia de una propiedad biológica general conocida como “plasticidad fenotípica”, que se define como la capacidad genética de un organismo para mostrar distintos fenotipos bajo diversas condiciones medioambientales (De Jong y Bijma, 2002). La plasticidad fenotípica es compleja y de carácter poligénico, por lo tanto, resulta evidente la necesidad de implementar metodologías que permitan estudiarla de manera confiable, eficiente y precisa, a fin de comprenderla de mejor manera y tomar decisiones de selección más acertadas. Debido a la complejidad antes mencionada, el descubrimiento de los genes que controlan la plasticidad fenotípica es una tarea difícil, sobre todo por la dificultad para establecer una clasificación fenotípica confiable, puesto que ningún indicador (fisiológico o ambiental) es capaz por sí solo de capturar todas las respuestas involucradas en la adaptación del animal, como por ejemplo la disipación de calor en conjunto con la productividad lechera (McManus *et al.*, 2009).

## **2.7 Métodos de clasificación de la habilidad termoregulatoria del ganado lechero**

En la continua búsqueda de un equilibrio entre el desempeño animal y el medio ambiente que lo rodea, la capacidad de adaptación es un factor de constante preocupación (Filho *et al.*, 1999), siendo la tolerancia al calor uno de los aspectos más importantes. La adaptabilidad podría definirse como la habilidad de un animal para ajustarse tanto a las condiciones ambientales promedio, como a los extremos climáticos de una zona determinada (McManus *et al.*, 2009). De acuerdo con lo expuesto por Baccari Jr (1986), un

animal bien adaptado a una zona cálida se caracteriza principalmente por el mantenimiento de la homeotermia, así como por mínimas pérdidas en el desempeño productivo, el mantenimiento de una alta eficiencia reproductiva y una elevada resistencia a enfermedades durante periodos de estrés. Con la finalidad de definir la capacidad de regulación térmica de los animales sometidos a condiciones de estrés por calor, han surgido diversas propuestas de estimación del grado de termotolerancia, como por ejemplo el coeficiente de tolerancia al calor y la estimación de la interacción Genotipo x Ambiente a través de modelos de norma de reacción.

### **2.7.1 Coeficiente de tolerancia al calor**

El coeficiente de tolerancia al calor (HTC, del inglés “*Heat tolerance coefficient*”), es un indicador fisiológico compuesto que brinda información sobre la habilidad del ganado para disipar el exceso de calor contenido en su cuerpo (Singh *et al.*, 2013). La fórmula que se aplica para su cálculo es:

$$HTC = 100 - 10 (TR - 101^{\circ} F),$$

donde *HTC* es el coeficiente de tolerancia al calor, *TR* es el promedio de la temperatura rectal en grados Fahrenheit de al menos 6 mediciones y  $101^{\circ}F$  representa la temperatura rectal promedio del ganado.

La manera de interpretar el resultado del HTC es que mientras más cercano a 100 sea el valor resultante, el individuo es más termotolerante que otros. Mientras que si en dado caso existen dos individuos con el mismo HTC, aquel que posea menos respiraciones por minuto será más tolerante (Rhoad, 1944).

### **2.7.2 Estimación de la interacción Genotipo x Ambiente a través del modelo de norma de reacción**

Debido a que el estrés por calor es una condición patológica asociada a un reto ambiental, la capacidad de adaptación puede provocar variaciones en el grado de afectación

de cada individuo ante las condiciones ambientales específicas de una zona determinada (Enns *et al.*, 2011). Dichas variaciones pueden ser calculadas a partir de la estimación del grado de interacción genotipo x ambiente (G x A), ya que cada genotipo responde de manera diferente, es decir, expresa un fenotipo distinto frente a los cambios ambientales (Kolmodin *et al.*, 2002). Existen diferentes metodologías estadísticas para estimar la interacción G x A, sin embargo, una comprensión más profunda de los componentes genéticos de la tolerancia al estrés por calor puede ser alcanzada mediante el uso de modelos de norma de reacción, basados en el concepto de norma de reacción definido por De Jong (1990), como el rango de expresiones fenotípicas de un determinado genotipo en respuesta a cambios sistemáticos de una variable ambiental continua. Menéndez-Buxadera *et al.* (2012), implementó la metodología de modelos de norma de reacción en cabras lecheras de las razas Murciano-Granadina y Payoya, logrando identificar los cambios en la habilidad productiva de las cabras en respuesta a las variaciones ocurridas en el ITH, caracterizando de manera eficiente la respuesta productiva y termoregulatoria de dichos animales. Posteriormente, Menéndez-Buxadera *et al.* (2013) y Menéndez-Buxadera *et al.* (2014) reportaron el mismo patrón de respuestas pero esta vez con cabras lecheras de la raza Murciano-Granadina y ovejas de la raza Merino de Grazalema.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Lugar de estudio

El estudio se realizó en el establo comercial “El Llano”, ubicado en el block 1114 del valle del Yaqui, Sonora, México (LN: 27° 32', LO: 109° 87', 50 msnm). Esta región posee un clima que varía de seco a semi-húmedo, y en verano se caracteriza por ser cálido, con temperatura promedio de 32 °C, con máxima y mínima diarias de 48 y 27 °C, respectivamente. La precipitación pluvial promedio anual es de 371.6 mm, concentrándose la mayor cantidad de las lluvias durante los meses de julio, agosto y septiembre (Ruíz *et al.*, 2005, Rivera-Acuña *et al.*, 2015).

### 3.2 Unidades experimentales y condiciones de manejo

Se utilizaron 100 vacas multíparas Holstein, hijas de 29 toros y 83 vacas, las cuales presentaban una condición corporal de entre 2.5 y 3.5 unidades (escala del 1 al 5, donde 1=emaciada y 5=obesa, Edmonson *et al.*, 1989). Los animales se encontraban alojados en corrales de manejo intensivo (45 x 50 m) proporcionando un área de 45 m<sup>2</sup>/vaca, provistos de un pasillo central de alimentación completamente sombreado, con acceso libre al agua y una sombra en el centro del corral generada por techos de lámina galvanizada (6 x 45 m) proporcionando un área de sombra de 5 m<sup>2</sup>/vaca. Los animales recibieron una ración mixta compuesta aproximadamente por 60% de forraje (ensilaje de maíz) y 40% de un concentrado comercial (los porcentajes de cada ingrediente se muestran en el Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Ingredientes y composición química del concentrado comercial.

Ingrediente	% en base seca
Proteína Cruda	20.0
Grasa	5.0
Fibra	3.0
Cenizas	7.0
Humedad	12.0

La dieta fue elaborada para cubrir sus necesidades nutricionales de acuerdo a los requerimientos establecidos por el NRC (consumo de materia seca de 19.5 kg, 0.4 kg de cambio en el peso vivo, 30.1 Mcal de energía neta metabolizable, 1980 g/d proteína degradable en rumen, 1010 g/d proteína no degradable en el rumen, 10.2 % proteína degradable en rumen, 5.2 % proteína no degradable en rumen, 15.4 % proteína cruda) para vacas lecheras en producción con un peso vivo de 450 kg, producción promedio de 30 kg/d, con una composición de 4.0 y 3.2 % de grasa y proteína en leche, respectivamente.

Durante los meses más cálidos del año, las vacas fueron sometidas a 45 minutos de enfriamiento artificial mediante 3 baños al día (uno previo a cada ordeña, 05:00-17:00 h, más un enfriamiento adicional aproximadamente a las 13:00 h), utilizando un sistema de enfriamiento de baja presión. Los baños consistieron en 5 min de agua (gasto aproximado de 15 L por vaca/serie), alternado con 10 minutos de ventilación forzada generada por abanicos de aluminio eléctricos de 70 cm de diámetro, con una potencia de ½ HP colocados en el área de la sala de ordeña a una altura de 2.80 m del piso (Schaefer Ventilation Equipment, Sauk Rapids, MN, USA).

### **3.3 Colección de datos fenotípicos**

Se colectaron un total de 4403 registros individuales de producción de leche (kg leche/vaca/día) en un periodo comprendido desde Agosto del 2010 hasta Agosto del 2013; cada registro individual fue el resultado de la suma dos pesajes de leche derivados de las dos ordeñas que se realizaban durante el día (05:00 – 17:00 h). Los pesajes de leche fueron llevados a cabo aproximadamente dos veces al mes, mediante el uso de pesaleches (Waikato MK V Milk Meter®, QubikTMC). Con los valores de producción de leche total (PLT) de cada vaca en cada una de las tres lactancias (2011, 2012 y 2013), se calcularon los

valores de promedio diario de producción de leche total (PDLT), producción de leche ajustada a 305 días (PLA305) y promedio diario de producción de leche ajustado a 305 días (PDLA305) mediante la metodología propuesta en el manual de la Programa Nacional Cooperativo de mejoramiento del ganado lechero (NCDHIP, 1986).

Adicionalmente, por ser indicadores fisiológicos de estrés calórico, la temperatura rectal (TR) y frecuencia respiratoria (FR) fueron medidas 1 vez al día (entre las 13:00 y las 17:00 h), dos veces por semana durante 3 semanas en los meses de Julio y Agosto del año 2013. Cabe mencionar que durante el periodo de muestreo fue suspendido el baño adicional de las 13:00 h en la población de estudio con la intención de capturar mediciones fisiológicas no sesgadas por el sistema de enfriamiento de la respuesta termoregulatoria de cada animal. La FR se evaluó contando los movimientos costales de manera visual durante un minuto, mientras que la TR se midió con un termómetro rectal digital (Delta Track, CA®. USA). Las estadísticas descriptivas para los indicadores fisiológicos y productivos de la población de estudio se realizaron con el procedimiento MEANS del paquete estadístico SAS 9.4 (SAS 9.4, SAS Institute, Cary, NC, USA).

### **3.4 Colección de datos climáticos**

Los datos de temperatura ambiental (TA; °C) y humedad relativa (HR; %) se obtuvieron de una estación climática que se encontraba aproximadamente a 3 km del lugar de estudio, perteneciente a la Red de Estaciones Agroclimáticas del Estado de Sonora. Los datos de dicha estación se obtuvieron del sitio web [www.agroson.org.mx](http://www.agroson.org.mx). La información recolectada fue utilizada para calcular el principal indicador ambiental del estrés por calor, el ITH, mismo que fue estimado primeramente por hora del día, y posteriormente, a partir de dichos resultados fue calculado un promedio para cada día de todos los años de estudio (2010-2013). El ITH fue calculado con la fórmula propuesta por Hahn (1999):

$$ITH = (0.81 \times T^{\circ}C) + \left[ \left( \frac{HR}{100} \right) \times T^{\circ}C - 14.4 \right] + 46.4$$

donde *ITH* se refiere al Índice de temperatura y humedad,  $T^{\circ}C$  es la temperatura ambiental en grados Celsius y *HR* es el porcentaje de humedad relativa.

Las estadísticas descriptivas para las condiciones climáticas registradas diariamente durante todo el periodo de estudio (Agosto del 2010 hasta Agosto del 2013) se realizaron con el procedimiento MEANS del paquete estadístico SAS 9.4 (SAS 9.4, SAS Institute, Cary, NC, USA).

### **3.5 Caracterización de la respuesta termoregulatoria en las unidades experimentales**

Con la finalidad de evaluar la efectividad en la caracterización de las respuestas termoregulatoria y productiva del ganado por parte de los modelos de norma de reacción, primeramente se evaluaron dichas respuestas de manera independiente, la habilidad termoregulatoria a través del cálculo del coeficiente de tolerancia al calor y la habilidad productiva mediante la estimación de PLA305 para cada animal.

#### **3.5.1 Estimación del Coeficiente de Tolerancia al Calor (HTC)**

Con los datos obtenidos para la TR y FR en los meses de julio y agosto del año 2013, en una hoja de cálculo de Excel (Microsoft Office Excel 2013), se desarrolló la siguiente fórmula:

$$HTC = 100 - 10 (RT - 101^{\circ}F)$$

donde *HTC* es el coeficiente de tolerancia al calor, *RT* es el promedio de la temperatura rectal en grados Fahrenheit de las 6 mediciones (19-Jul-2013, 23-Jul-2013, 26-Jul-2013, 29-Jul-2013, 2-Ago-2013 y 7-Ago-2013) y  $101^{\circ}F$  representa la RT promedio del ganado.

De acuerdo con lo expuesto por Rhoad (1944), mientras más cercano a 100 sea el HTC, el individuo es más termotolerante que otros. Si en dado caso existen dos individuos con el mismo HTC, aquel que posea menos respiraciones por minuto será más tolerante. Adicionalmente, una vez clasificados y organizados los animales, los valores de PLA305 de la lactancia 2013 fueron emparejados con los valores resultantes del HTC para cada animal con la finalidad de evaluar en conjunto la habilidad productiva con la capacidad de disipación de calor. Posteriormente, ambos resultados fueron comparados con los patrones de respuesta obtenidos con los modelos de norma de reacción.

### **3.5.2 Estimación de la interacción G x A mediante la aplicación el modelo de norma de reacción**

Primeramente se estableció el pedigrí de la población de estudio, el cual incluyó un total de 212 animales (100 vacas, hijas de 29 toros y 83 vacas). Posteriormente, los registros productivos (registros individuales de producción de leche al día) fueron emparejados con el ITH tomando como referencia la fecha del pesaje de la leche, esto con el objetivo de determinar el grado de influencia del ambiente sobre el desempeño productivo de los animales. Se analizaron un total de 8 ITH diferentes, partiendo del ITH propio de la fecha de pesaje de leche (ITH0) y llegando hasta el ITH de 7 días previos al pesaje de leche (ITH8). Una vez emparejados los datos, se realizó un análisis de regresión utilizando el procedimiento “stepwise” del paquete estadístico SAS 9.4 (SAS 9.4, SAS Institute, Cary, NC, USA), con la finalidad de encontrar el ITH de mayor impacto en la producción de leche. Una vez determinado cuál de los ITH resultaba ser más significativo, dicho dato fue retenido para la aplicación del modelo de norma de reacción descrito a continuación y resuelto con el software ASReml 3.0 (Gilmour *et al.*, 2009):

$$y_{ijklmn} = GC_i + Edad_j + Lac_k + \sum \Phi_r b_{lr} + \sum \Phi_r a_{mr} + p_n + e_{ijklmn}$$

donde

$Y_{ijklmn}$  es el conjunto de registros productivos (4403 pesajes de leche individuales) de producción de leche;

$GC_i$ , es el i-ésimo grupo contemporáneo (con 38 niveles, cada nivel definido por una diferencia máxima de 15 días en la fecha de parto entre los animales del mismo grupo);

$Edad_j$ , es la j-ésima edad de cada vaca en su respectivo año de lactancia (11 niveles);

$Lac_k$ , es el k-ésimo número de lactancias de cada vaca en su respectivo año de lactancia (11 niveles), fueron incluidos como efectos fijos dentro del modelo.

$b_l$  es una covariable fija modelada mediante un polinomio de Legendre ( $\Phi_r$ ) de segundo orden ( $r = 2$ ) incluida para representar la respuesta promedio de producción de leche de la población a lo largo de la escala del ITH;

$a_m$  es un vector de efectos genéticos aleatorios debidos al m-ésimo animal que produjo el dato y sus ancestros sin datos;

$\Phi_r$  es un vector de covariables modeladas con un polinomio de Legendre de primer orden (otros órdenes de ajuste  $r = 2, 3$  fueron evaluados pero un hubo convergencia) evaluadas con su respectivo valor de ITH normalizado en un intervalo [-1, 1];

$p_n$  es un efecto ambiental aleatorio individual y permanente debido a la repetición de los mismos datos en cada uno de los animales ( $n = 100$  animales con registros), y

$e_{ijklmn}$  es un término de error aleatorio común a todas las observaciones.

En este modelo de reacción de norma mixto y lineal se asumió que los componentes de varianza a través de la trayectoria del ITH fueron:

$$V(\mathbf{y}) = \left[ \mathbf{A} \otimes \mathbf{K}_a = \Phi_i \begin{pmatrix} \sigma_{ao}^2 & \sigma_{aos} \\ \sigma_{aso} & \sigma_{as}^2 \end{pmatrix} \Phi'_i \right] + \mathbf{I}_p \sigma_p^2 + \mathbf{R}$$

donde

$\mathbf{K}_a$  representa una matriz 2 x 2 de coeficientes genéticos de regresión aleatorios, los cuales poseen un intercepto con varianza;

$\sigma_{ao}^2$  para la capacidad genética general de los animales a tolerar el estrés por calor y la capacidad genética específica de cada animal con varianza;

$\sigma_{as}^2$  para reaccionar ante el estrés por calor y su covarianza;

$\sigma_{aso}$  para tolerarlo;

$\mathbf{I}$  es una matriz de identidad de orden  $\mathbf{p}$  (número de animales con datos);

$\sigma_p^2$  es el componente de varianza del efecto ambiental permanente;

$\mathbf{R}$  es la matriz de efectos residuales;

$\mathbf{A}$  es la matriz de relaciones.

Los estimados de los componentes de (co)varianza a través de la trayectoria del ITH fueron calculados de acuerdo a lo establecido por Jamrozik y Schaeffer (1997):

$$\sigma_{ai}^2 = \Phi_i \mathbf{K}_a \Phi'_i$$

$$\sigma_{aij} = \Phi_i \mathbf{K}_a \Phi'_j$$

Los estimados de heredabilidad ( $h^2$ ) y de correlaciones genéticas ( $r_g$ ) entre puntos adyacentes a lo largo de los valores de la escala del ITH fueron obtenidos mediante la aplicación de la fórmula clásica con los componentes de (co)varianza utilizando los

coeficientes correspondientes de polinomios de Legendre. El valor genético esperado (*del inglés, “Expected Breeding Value” – EBV*) para cada animal en el *i*-ésimo nivel de ITH fue calculado de la siguiente manera:

$$EBV_m^i = \mathbf{a}_m \Phi_i$$

donde

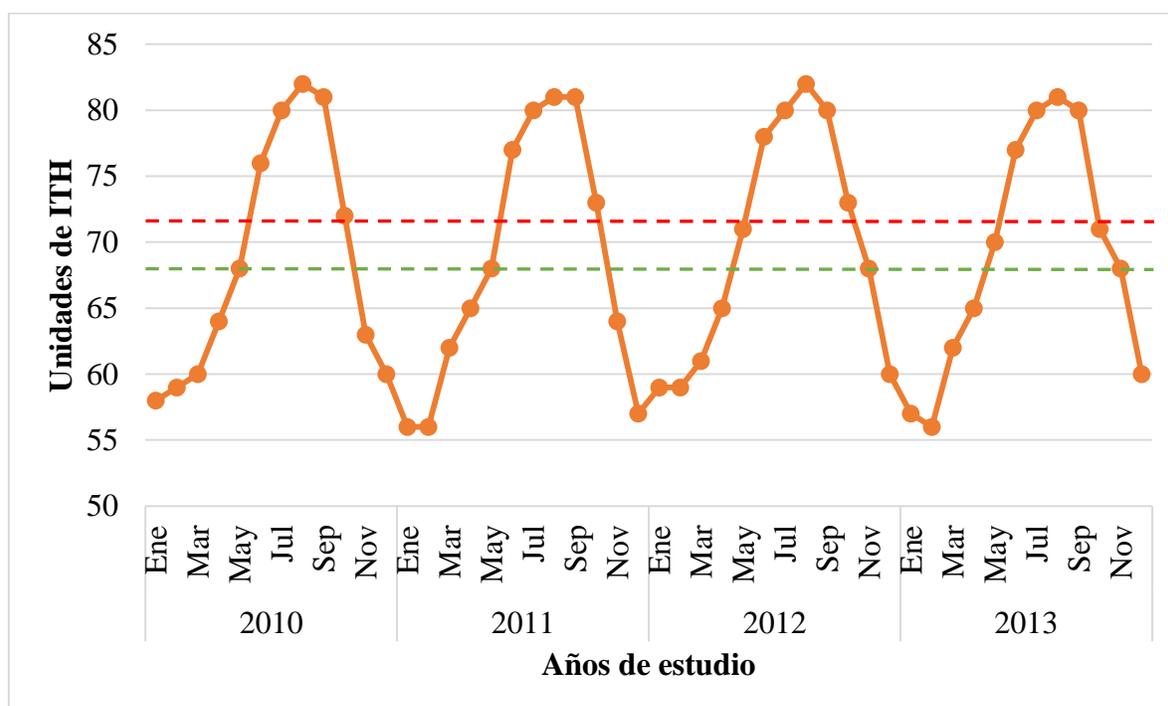
$\Phi_i$  son los correspondientes coeficientes de los polinomios de Legendre para el *i*-ésimo nivel de ITH,

$\mathbf{a}_m = [\mathbf{a}_0 \ \mathbf{a}_s]$  es la función genética de cada animal estimada con el modelo previamente descrito.

De manera general se consideró un  $P < 0.05$  como significativo para todos los análisis estadísticos del presente estudio.



comienza a descender de poco a poco hasta aproximadamente enero o febrero del año consecutivo.



**Gráfica 5.** Trayectoria del ITH durante el periodo 2010-2013 para la región del valle del Yaqui, Sonora, México. Línea punteada verde indica el inicio estrés por calor sugerido por Zimelman et al., (2009) (68 unidades) y línea punteada roja indica el inicio del estrés por calor sugerido por Armstrong, (1994) (72 unidades).

De acuerdo con Armstrong (1994) y Zimelman *et al.* (2009), es posible notar que el ITH calculado para la región del valle del Yaqui en el periodo 2010-2013 rebasa los distintos puntos de partida establecidos para el inicio del estrés por calor en bovinos lecheros desde aproximadamente mayo hasta octubre de cada año. Partiendo de lo anterior, es posible deducir las razones de la falta de animales en algunas lactancias y la programación de los partos hacia los meses más fríos del año; por una parte, si alguna de las vacas tuviera su parto en un mes cercano a la época cálida como abril, es muy probable

que después de su puerperio dicha vaca tuviera que enfrentarse a condiciones climáticas hostiles (aumento de las temperaturas ambientales) que sin duda dificultarían su eficiencia reproductiva, y por ende, su habilidad para presentar lactancias consecutivas cada año; por otro lado, si una vaca tuviera su parto al principio de la época cálida del año (por ejemplo mayo), tendría que enfrentarse por 6 meses al reto ambiental del estrés por calor, situación que por supuesto mermaría su capacidad productiva y reproductiva. Explicaciones como la anterior, pueden ser sustentadas de acuerdo a lo indicado por Rivera-Acuña *et al.* (2015), quienes señalan que en la región del valle del Yaqui, los periodos de altas temperaturas de verano con intensa radiación solar provocan una baja eficiencia reproductiva y una drástica reducción en los niveles de producción de leche. Dichos señalamientos coinciden con diversos reportes en la literatura que indican que durante los meses más cálidos del año, ocurre una notable disminución de la eficiencia reproductiva del ganado como consecuencia de los efectos negativos del estrés por calor (Bandinga *et al.*, 1985; De Rensis y Scaramuzzi, 2003; Morton *et al.*, 2007). De igual manera, también ocurren una significativa disminución del desempeño productivo de las vacas lecheras (Bernabucci *et al.*, 2014; Hammami *et al.*, 2013; Mauger *et al.*, 2015).

Otro dato interesante en la Gráfica 5 es que los meses de reto ambiental más severo para el ganado son julio, agosto y septiembre; dicho dato es de vital importancia puesto que de acuerdo a lo expuesto por Ruiz *et al.* (2015), en dichos meses es cuando se concentra la mayor parte de la precipitación pluvial en la zona, provocando un aumento considerable en los valores del ITH. Bohmanova *et al.* (2007) indicaron que en zonas con climas cálidos y húmedos, el factor que más influye en la aparición del estrés por calor en los bovinos es la humedad, puesto que al combinarse temperaturas ambientales altas propicia que los

mecanismos de enfriamiento evaporativos de los bovinos, tales como la sudoración y el jadeo, se tornen ineficientes y provoquen grados de estrés por calor más severos en el ganado (Bouraoui *et al.*, 2002; Mader *et al.*, 2006; Pereira *et al.*, 2014).

La severidad del estrés por calor padecida por los bovinos lecheros radicados en el valle del Yaqui fue descrita por Leyva *et al.* (2008b), quienes mencionan que debido al alto porcentaje de humedad relativa provocado por las precipitaciones pluviales ocurridas en los meses de julio y agosto, los niveles de ITH se elevan por encima de 84 unidades durante las horas de luz y de 74 unidades por la noche, causando en el ganado un estrés por calor de tipo crónico.

En el Cuadro 2 se presentan las condiciones climáticas registradas diariamente durante las distintas lactancias analizadas en la población de estudio. La temperatura ambiental, la humedad relativa y el ITH, fueron considerablemente mayores en los meses de agosto y septiembre en comparación con el resto de los meses incluidos en cada una de las lactancias (2011, 2012 y 2013).

**Cuadro 2.** Condiciones climáticas registradas diariamente durante el periodo de estudio.

Variables Climáticas	Meses de estudio (Lactancia 2011)							
	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Temperatura (°C)								
Máxima	32.6	32.5	30.3	26.0	18.4	17.3	18.4	21.4
Mínima	27.6	27.3	19.8	14.2	12.7	12.4	4.3	14.5
Promedio	30.6	29.9	25.2	18.9	16.3	14.1	13.8	17.9
Humedad Relativa (%)								
Máxima	78.0	79.6	71.4	71.9	86.0	77.7	72.5	73.2
Mínima	56.1	60.9	36.6	21.8	46.0	49.7	37.7	48.6
Promedio	67.5	69.1	57.5	54.9	67.1	66.7	62.7	62.4
ITH <sup>1</sup> (Unidades)								
Máxima	84.0	84.0	81.0	69.0	63.0	61.0	62.0	66.0
Mínima	79.0	78.0	65.0	57.0	54.0	54.0	46.0	57.0
Promedio	82.0	81.0	72.0	62.0	59.0	56.0	56.0	62.0

		<b>Meses de estudio (Lactancia 2012)</b>							
		<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
Temperatura (°C)	Máxima	32.5	32.5	30.6	23.2	18.3	19.9	18.2	22.1
	Mínima	26.1	27.3	21.9	15.3	11.4	13.4	12.8	14.2
	Promedio	30.1	29.9	26.4	19.3	14.0	16.1	15.6	17.3
Humedad Relativa (%)	Máxima	87.7	79.6	72.6	88.9	81.7	83.8	88.7	83.5
	Mínima	60.8	60.9	39.3	37.3	36.1	51.8	63.7	56.3
	Promedio	71.9	69.2	55.6	63.8	65.2	67.1	73.6	67.1
ITH <sup>1</sup> (Unidades)	Máxima	84.0	84.0	78.0	69.0	64.0	64.0	63.0	67.0
	Mínima	78.0	78.0	66.0	58.0	53.0	55.0	55.0	56.0
	Promedio	81.0	81.0	74.0	64.0	56.0	59.0	59.0	60.0
		<b>Meses de estudio (Lactancia 2013)</b>							
		<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
Temperatura (°C)	Máxima	34.9	31.8	30.2	25.2	20.3	20.5	16.9	21.9
	Mínima	26.0	26.0	23.2	18.1	13.1	7.8	11.3	13.9
	Promedio	30.1	29.3	26.1	21.9	16.4	13.9	13.8	18.0
Humedad Relativa (%)	Máxima	85.8	82.4	87.6	76.8	76.1	80.6	79.6	84.6
	Mínima	50.0	63.2	44.4	45.4	54.0	40.1	49.3	49.0
	Promedio	68.1	72.8	62.0	63.2	66.3	64.6	69.7	66.7
ITH <sup>1</sup> (Unidades)	Máxima	85.0	84.0	81.0	72.0	65.0	67.0	62.0	67.0
	Mínima	77.0	76.0	69.0	62.0	56.0	49.0	52.0	56.0
	Promedio	82.0	80.0	73.0	68.0	60.0	56.0	56.0	62.0

<sup>1</sup>Índice de Temperatura y Humedad

#### **4.2 Indicadores fisiológicos y productivos**

Las estadísticas descriptivas para los indicadores fisiológicos de estrés por calor se muestran en el Cuadro 3. De manera general, es posible observar que los valores promedio de TR (40.4 °C) y FR (83 rpm) superaron los límites superiores de los rangos fisiológicos normales para vacas adultas (TR= 39 °C y FR= 30 rpm) (Posadas *et al.*, 2000). Lo anterior puede ser atribuido al grado de reto ambiental al cual se encontraba sometida la población de estudio en el momento de la medición de las variables fisiológicas. Durante el horario de la toma de muestra y los días de muestreo, el ITH rebasó considerablemente los valores establecidos como los puntos de inicio del estrés por calor para bovinos lecheros (72

unidades; Armstrong, 1994; Zimbelman *et al.*, 2009). Dichos resultados concuerdan con reportes en la literatura que indican que bajo condiciones de estrés por calor, la TR y la FR del ganado Holstein aumentan significativamente (Srikandakumar y Johnson, 2004; Karimi *et al.*, 2015; Perano *et al.*, 2015).

**Cuadro 3.** Promedios y errores estándar de indicadores fisiológicos de estrés por calor en ganado Holstein

<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>Media ± EE</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
Temperatura rectal (°C)	100	40.4 ± 0.04	39.6	42.1
Frecuencia respiratoria (Resp/min)	100	83.0 ± 0.69	67.0	100.0

En el Cuadro 4 se observan las estadísticas descriptivas para los indicadores productivos: producción de leche total (PLT), promedio diario de producción de leche (PDL), producción de leche ajustada a 305 días (PLA305), promedio diario de producción de leche ajustado a 305 días (PDLA305), edad, número de lactancias y días en leche (DEL) para cada una de las 3 lactancias analizadas (2011, 2012 y 2013).

**Cuadro 4.** Promedios y errores estándar de indicadores productivos en ganado Holstein.

<b>Lactancia</b>	<b>Variable</b>	<b>n</b>	<b>Media ± E.E.</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
2011	PLT <sup>1</sup> (Kg)	93	6862.8 ± 148.36	2890	10540
	PDL <sup>2</sup> (Kg)	93	23.7 ± 0.45	13.9	41
	PLA305 <sup>3</sup> (Kg)	93	7544.3 ± 126.31	4693.2	11804.8
	PDLA305 <sup>4</sup> (Kg)	93	24.7 ± 0.42	15.4	38.7
	Edad	100	4.7 ± 0.18	2	10
	No. Lactancias	100	2.6 ± 0.18	0	8
	Días en Leche	93	287.5 ± 3.80	132	405
2012	PLT <sup>1</sup> (Kg)	87	7626.7 ± 169.99	4822	11693.6
	PDL <sup>2</sup> (Kg)	87	24.9 ± 0.44	17.2	35.2
	PLA305 <sup>3</sup> (Kg)	87	7685.4 ± 130.81	5235.7	10664.8
	PDLA305 <sup>4</sup> (Kg)	87	25.2 ± 0.43	17.2	35
	Edad	100	5.7 ± 0.18	3	11
	No. Lactancias	100	3.5 ± 0.18	1	9
	Días en Leche	87	305.3 ± 4.49	137	421

	PLT <sup>1</sup> (Kg)	100	7613.4 ± 166.40	3095.3	11270
	PDL <sup>2</sup> (Kg)	100	31.2 ± 0.49	20.1	42.7
	PLA305 <sup>3</sup> (Kg)	100	8786.5 ± 132.45	5262	11893
2013	PDLA305 <sup>4</sup> (Kg)	100	28.8 ± 0.43	17.3	39
	Edad	100	6.7 ± 0.18	4	12
	No. Lactancias	100	4.5 ± 0.18	2	10
	Días en Leche	100	246.4 ± 5.03	128	351

<sup>1</sup>Producción de leche total

<sup>2</sup>Promedio diario de producción de leche

<sup>3</sup>Producción de leche ajustada a 305 días

<sup>4</sup>Promedio diario de producción de leche ajustado a 305 días

Los resultados del presente estudio para PLT concuerdan con los reportados por Horan *et al.* (2005) en vacas Holstein. Por su parte, los resultados para los indicadores PLA305 y PDLA305 son muy similares a los que han señalado autores como Banos y Shook (1990), Buckley *et al.* (2003) y Van Dorp *et al.* (2003). Para el caso de variables como edad y número de lactancias, la presente investigación indica que las vacas incluidas en este estudio se encuentran por arriba del promedio de edad y de lactancias del ganado Holstein de los Estados Unidos de América (Nieuwhof *et al.*, 1989), pero son muy similares a los reportados por Vargas *et al.* (2002) para ganado Holstein de Costa Rica; dichas diferencias y similitudes podrían ser atribuidas a los sistemas de producción utilizados en cada país (Posadas *et al.*, 2004). Por último, Bohmanova *et al.* (2007) reportaron resultados para DEL muy similares a los indicados en este estudio.

#### **4.4 Nivel de tolerancia al estrés por calor determinado mediante el cálculo del coeficiente de tolerancia al calor**

Los resultados de la clasificación del nivel de termotolerancia mediante la estimación del coeficiente de tolerancia al calor así como el PLA305 para la lactancia del 2013 se muestran en el Cuadro 5. Es importante destacar que estos resultados se limitan

únicamente a la lactancia del 2013, puesto que solamente se realizaron mediciones fisiológicas de TR y FR en dicha lactancia.

**Cuadro 5.** Clasificación del nivel de termotolerancia mediante el coeficiente de tolerancia al calor

Ranking	ID <sup>1</sup>	HTC <sup>2</sup>	FR <sup>3</sup>	PLA305 <sup>4</sup>	Ranking	ID <sup>1</sup>	HTC <sup>2</sup>	FR <sup>3</sup>	PLA305 <sup>4</sup>
1	530	77.5	83	9344.5	39	536	65.2	86	8218.5
2	1068	74.8	82	9379.1	40	360	65.2	89	10431.7
3	520	73.0	81	6471.4	41	519	64.9	72	8349.9
4	337	72.7	82	10465.3	42	410	64.9	74	7720.8
5	493	72.4	77	5758.6	43	510	64.9	86	9233.9
6	378	72.4	78	9536.9	44	421	64.3	74	8861.0
7	367	72.1	88	8158.3	45	533	64.0	91	9095.3
8	586	71.8	85	8334.9	45	381	64.0	91	8395.1
9	419	70.9	88	6612.4	46	356	63.7	82	9587.3
10	463	70.3	74	9038.8	47	341	63.7	85	9969.8
11	1605	70.0	84	8472.5	47	509	63.7	85	9568.8
12	268	69.4	87	9380.9	48	445	63.4	75	8189.3
13	458	69.4	91	8867.1	49	461	63.1	70	9053.8
14	512	68.8	78	7572.5	50	218	63.1	75	9257.6
15	450	68.8	82	10192.6	51	545	62.5	76	9229.8
16	411	68.2	67	7446.3	52	539	62.5	89	10276.9
17	336	68.2	75	8700.6	53	81	61.9	83	9015.0
18	322	68.2	78	6837.9	54	1092	61.6	83	5262.0
19	339	68.2	86	8214.7	55	531	61.6	85	6642.3
20	363	67.9	77	9513.9	56	249	61.3	71	9131.8
21	108	67.9	79	10819.2	57	433	61.3	80	9192.8
22	113	67.9	85	9047.8	58	513	61.3	83	8685.5
23	155	67.3	75	6023.8	69	138	61.3	95	7552.8
24	460	66.8	88	8556.4	60	151	61.3	95	9278.7
25	736	66.7	83	7383.9	61	537	61.3	95	9350.6
26	565	66.4	70	8800.1	62	282	61.0	83	11893.0
27	1228	66.1	73	9901.6	63	515	61.0	88	7194.5
28	576	65.8	73	8202.8	64	1282	60.4	77	10175.1
29	402	65.8	74	7409.5	65	557	60.4	81	9424.1
30	526	65.8	86	9071.6	66	528	60.1	91	8377.9
31	171	65.8	91	11191.6	67	465	59.8	71	8145.3
32	447	65.8	100	9771.9	68	508	59.5	79	8178.6
33	361	65.5	77	7894.1	69	891	59.5	83	9241.6
34	504	65.5	81	10241.9	70	177	59.5	90	8726.9
35	470	65.5	84	9827.6	71	276	59.2	89	10988.0
36	1077	65.5	89	6864.5	72	1418	58.9	80	7842.8
37	370	65.5	90	11033.4	73	606	58.9	83	8047.5
38	324	65.2	84	6739.5	74	233	58.6	74	8071.4

75	366	58.0	80	7791.0	87	277	54.1	93	8812.4
76	300	58.0	87	8282.8	88	414	53.5	95	9780.0
77	266	56.8	88	11512.3	89	517	52.9	77	9554.2
78	213	56.5	87	7141.8	90	201	52.6	81	9997.9
79	220	56.2	80	9804.6	91	359	52.3	88	10690.6
80	555	56.2	88	6282.5	92	542	50.8	91	10912.4
81	442	55.3	79	9088.2	93	349	49.9	82	8574.7
82	454	55.3	91	9720.3	94	352	48.4	87	8421.9
83	428	55.3	94	10123.4	95	424	47.2	92	10197.0
84	168	55.3	97	10479.0	96	272	45.7	86	7438.0
85	514	54.4	83	8882.6	97	570	45.4	83	7093.6
86	296	54.1	88	8144.1	98	484	31.9	86	7034.6

<sup>1</sup> Número de identificación individual por animal

<sup>2</sup> Coeficiente de tolerancia al calor expresado en porcentaje

<sup>3</sup> Frecuencia respiratoria expresada en respiraciones por minuto

<sup>4</sup> Producción de leche ajustada a 305 días expresada en kilogramos

De acuerdo a la clasificación de termotolerancia obtenido mediante el cálculo del HTC, los animales identificados con los números 381 y 533 poseen exactamente el mismo nivel de termotolerancia (posición 45 en la clasificación ); lo mismo sucede con los animales 341 y 509 (posición 47 en la clasificación). Esto se debe a que en ambos casos, los animales tuvieron la misma TR y FR, dando como resultado una imposibilidad para discernir cuál de ellos posee mayor capacidad termoregulatoria de acuerdo a los criterios propuestos por Rhoad (1944). Debido a lo anterior, en la presente investigación se utilizó como un tercer criterio para la clasificación de la habilidad termoregulatoria el valor de la PLA305, con base en la premisa fisiológica de que un animal más productivo genera una mayor cantidad de calor endógeno (Bernabucci *et al.*, 2014; Hansen, 2013; Zimbelman *et al.*, 2011); es decir, aunque el HTC indique que poseen la misma capacidad de tolerancia, al existir diferencias en el nivel productivo también existirán diferencias en la cantidad total de calor que cada animal debe disipar, siendo más efectivo en la termorregulación el animal con mayor nivel productivo.

Además de lo anterior, observando los resultados de la clasificación establecida para la habilidad termoregulatoria por parte del HTC y los valores de PLA305 para la lactancia del 2013, existen animales que poseen una buena capacidad de disipación de calor, pero que a su vez, poseen bajos niveles productivos. Algunos ejemplos de esto son los animales 520 y 493, mismos que de acuerdo al HTC se ubican en la 3ra y la 5ta posición con capacidades de disipación de calor de 73 y 72.4 % respectivamente, sin embargo, sus valores de PLA305 se encuentran muy por debajo de la media obtenida para dicho carácter en la lactancia 2013 (Cuadro 4). Resultados como el anterior concuerdan con reportes en la literatura que señalan que la habilidad termoregulatoria en el ganado posee un antagonismo con la habilidad productiva (Kadzere *et al.*, 2002; Collier y Zimbelman, 2007; Bernanucci *et al.*, 2014). A pesar de que evidentemente el HTC no representa un indicador fenotípico ideal al no ser capaz de tomar en cuenta las variaciones productivas, desde el punto de vista de la genética molecular, existen reportes en la literatura que señalan la funcionalidad del HTC como fenotipo para identificar variantes génicas involucradas en la respuesta termoregulatoria del ganado bovino, por ejemplo, algunos autores señalan que los SNPs (Polimorfismos de Nucleótido Simple) dentro del gen que codifica para la proteína de choque térmico 90 alfa citosólica de clase B1 (HSP90AB1), se encuentran relacionados con el coeficiente de tolerancia al calor de ganado Sahiwal y Frieswal de la India y ganado White Lamphun de Tailandia (Charoensook *et al.*, 2012; Sajjanar *et al.*, 2015). Por su parte, Liu *et al.* (2010) indicaron que un SNP ubicado en el gen codificador para el polipéptido transportador de ATPasa, Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> 1  $\alpha$  (ATP1A1), mostró una asociación significativa con la frecuencia respiratoria de ganado Holstein, por lo que, dichos autores atribuyeron el incremento en el coeficiente de tolerancia al calor observado en los animales portadores de los alelos favorables.

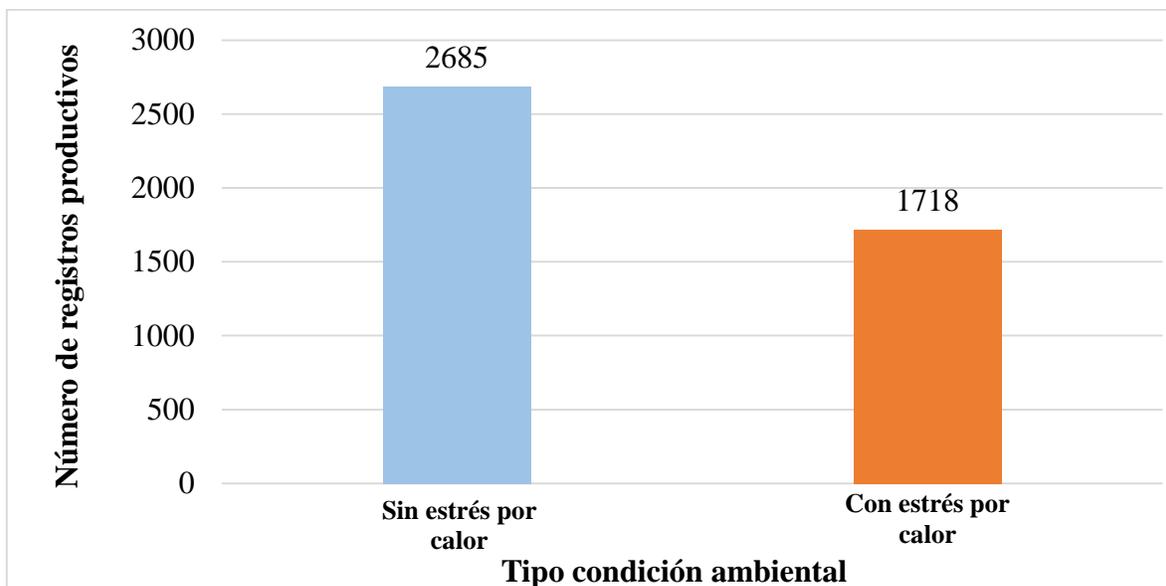
Si bien es cierto que el HTC ha demostrado ser útil para clasificar la capacidad de mantener la temperatura corporal dentro de rangos fisiológicos normales, su principal desventaja es que únicamente mide la habilidad para disipar el exceso de calor contenido en el cuerpo de los animales, pero no logra capturar las variaciones en la productividad del ganado. Lo anterior se traduce en una falta de practicidad en la utilización de dicho coeficiente como indicador fenotípico ideal para fines de selección en el ganado lechero, puesto que no toma en cuenta el rasgo de mayor importancia económica (producción de leche) y básicamente se trata de una selección orientada a la capacidad de regular la temperatura rectal, lo cual de acuerdo con Dikmen *et al.* (2012) y Hansen (2013), podría conducir a una selección en contra de la productividad lechera. Aunado a lo anterior, la medición de la TR durante periodos severos de estrés por calor puede resultar complicada debido a los requerimientos de movilización y entrapado del ganado, la cantidad de animales a evaluar y la naturaleza invasiva de la técnica de medición (Goodwin, 1998; Burfeind *et al.*, 2010), provocando una escasez de datos, especialmente para estudios genéticos (Finocchiaro *et al.*, 2005).

#### **4.4 Nivel de tolerancia al estrés por calor determinado mediante la aplicación de modelos de norma de reacción**

El pedigrí de la población incluyó 100 vacas multíparas de la raza Holstein, hijas de 29 toros y 83 vacas (consultar Anexo 1, página 62). El resultado del procedimiento “stepwise” dentro del análisis regresión realizado para los 8 posibles ITH, indicó que el ITH de 3 días previos al pesaje de la leche fue el que tuvo mayor grado de influencia sobre las variaciones productivas con una  $R^2 = 0.15$  ( $P < 0.001$ ); este resultado es similar al reportado por West *et al.* (2003) realizaron un análisis muy similar con ganado lechero

Holstein y Jersey, encontrando que el ITH de 2 días previos al pesaje de la leche tuvo un mayor impacto sobre los cambios en el desempeño productivo para ambas razas ( $R^2 = 0.22$  y  $R^2 = 0.18$ , en Holstein y Jersey respectivamente), sin embargo, analizando a cada raza por separado, el ITH de 3 días previos fue el que tuvo mayor impacto en la raza Holstein ( $R^2 = 0.24$ ). Bohmanova *et al.* (2008) reportaron que el ITH de 3 días previos al pesaje de leche es el que se encuentra más asociado a los cambios en la producción de leche en vacas Holstein.

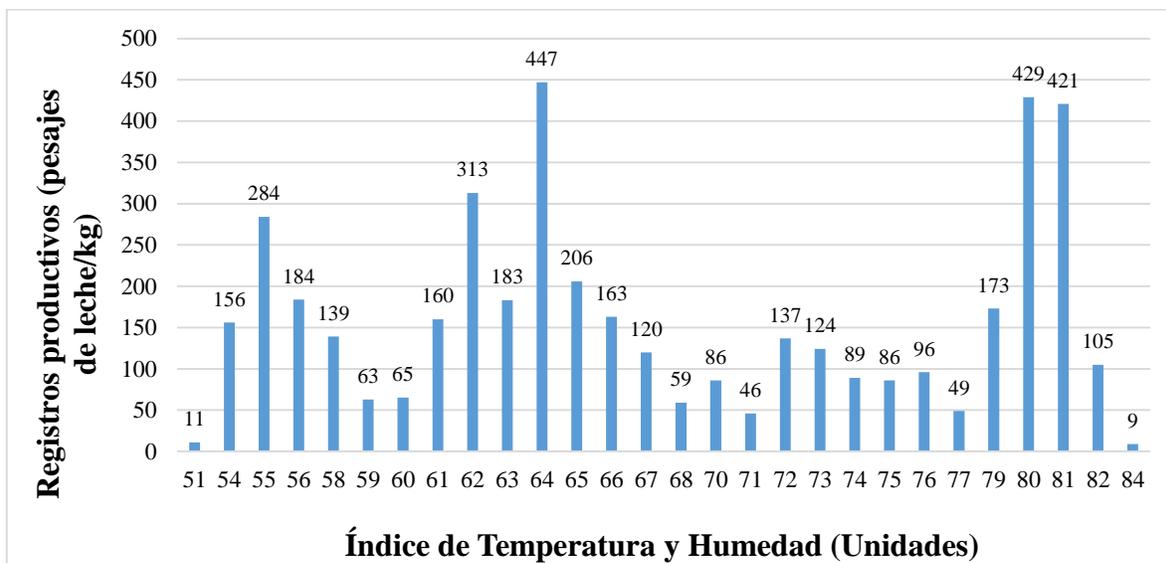
Una vez que se determinó que el ITH de 3 días previos fue el que tuvo mayor impacto sobre el desempeño productivo, dicho dato fue retenido para la aplicación de modelos de norma de reacción, mismos que al tratarse de metodologías estadísticas que permiten analizar la plasticidad fenotípica de los individuos, requieren que cada individuo dentro de la población de estudio posea mediciones del mismo fenotipo bajo escenarios climáticos diferentes. Con fines ilustrativos, la Gráfica 6 muestra la cantidad de pesajes de leche que existieron bajo condiciones climáticas termoneutrales (sin estrés por calor) y bajo condiciones climáticas propicias para la hipertermia, tomando como referencia el punto de partida para el estrés propuesto por Armstrong (1994).



**Gráfica 6.** Cantidad de pesajes de leche de acuerdo al tipo de condición ambiental.

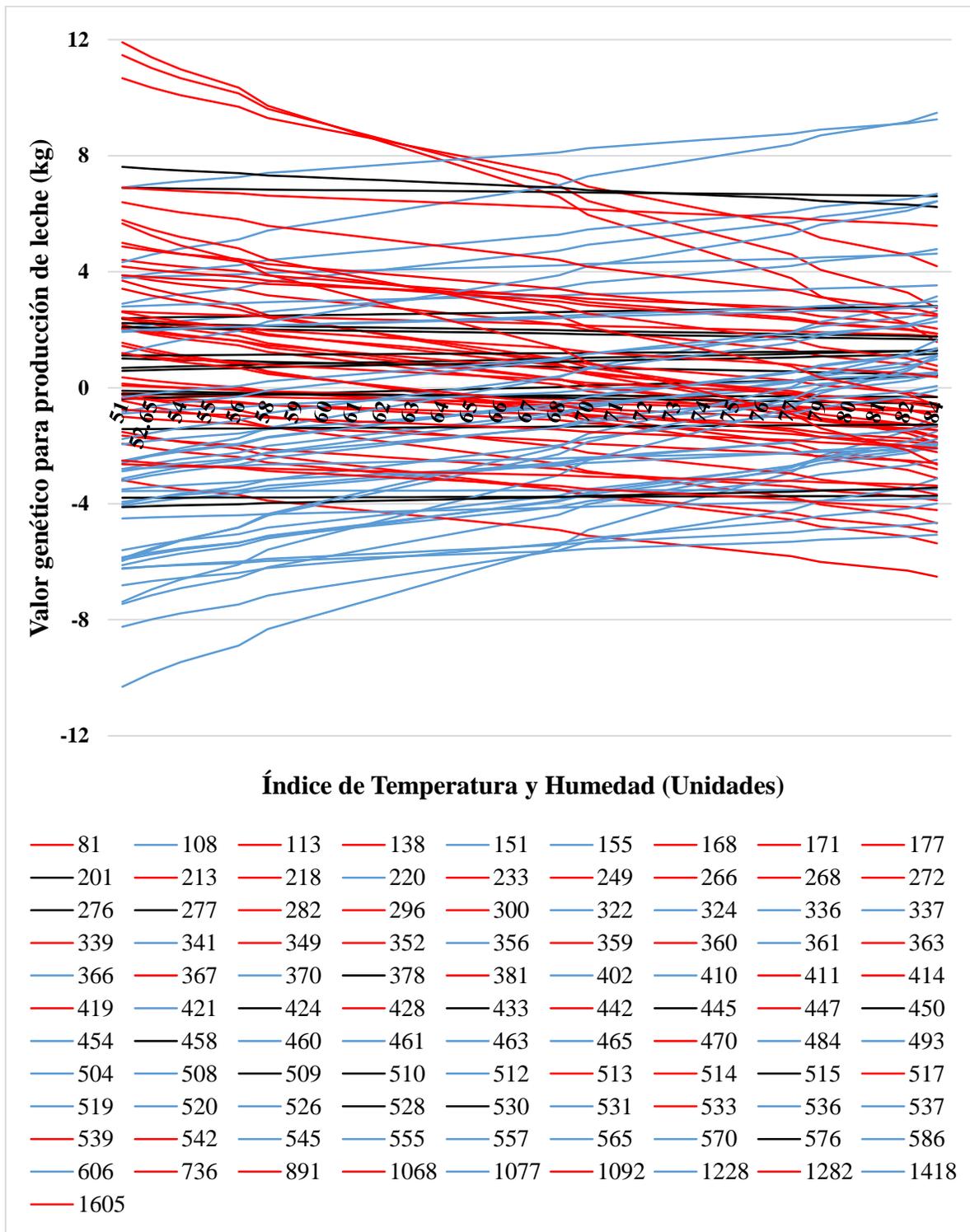
Tomando en cuenta que el número total de pesajes de leche fue de 4403, el 61% fueron obtenidos bajo condiciones climáticas favorables para el ganado, mientras que el 39% restante fueron observaciones registradas durante condiciones climáticas desfavorables de altas temperaturas para los animales. En la Gráfica 7 se muestra la cantidad total de registros productivos (pesajes de leche/kg) obtenidos para cada uno de los distintos valores de la escala del ITH. Debido a que los aumentos o las disminuciones en los valores del ITH son producto de las variaciones climáticas en los niveles de temperatura y humedad, es comprensible la cantidad de registros para cada punto en la escala del ITH no se encuentren distribuidos de manera equitativa, en especial cuando de un momento a otro ocurren variaciones drásticas en los niveles de HR del ambiente, tal y como sucede de manera natural cuando ocurren precipitaciones pluviales. En el caso específico de los registros productivos ubicados en los valores de 80 y 81 unidades en la escala del ITH, existe una gran concentración de los mismos en estos puntos de la escala debido a que son

pesajes de leche realizados durante la época de lluvias de la región (julio – septiembre), situación que genera niveles de ITH más elevados.



**Gráfica 7.** Cantidad de registros productivos para cada punto en la escala del ITH.

En la Gráfica 8 se muestran los diferentes tipos de respuesta de cada una de las 100 vacas incluidas en el estudio a las variaciones de los valores del ITH; dichas respuestas se midieron por el cambio (pendiente) en los valores genéticos para producción de leche (intercepto) a lo largo de la escala del ITH (Ravagnolo y Misztal, 2000; Menéndez-Buxadera *et al.*, 2012; Carabaño *et al.*, 2014).

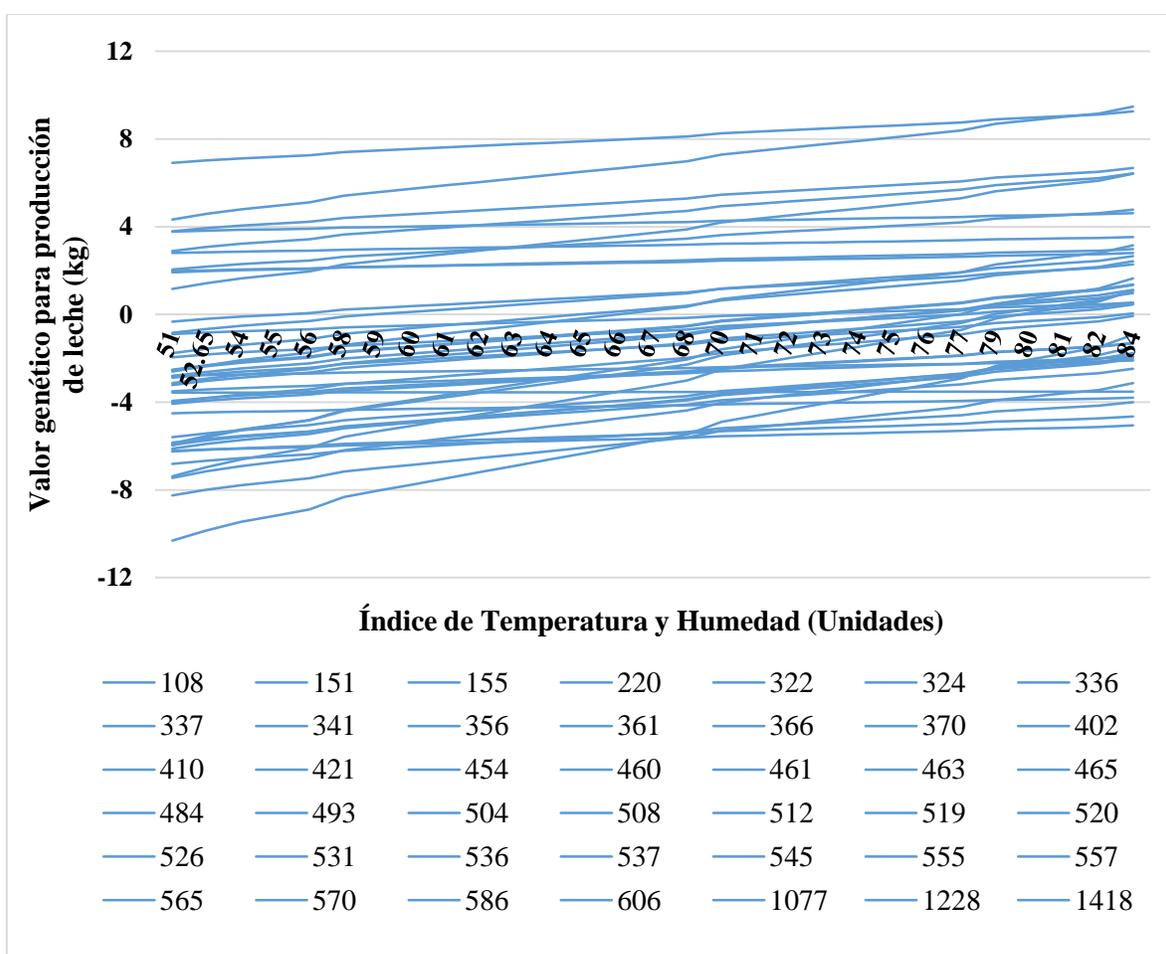


**Gráfica 8.** Tipos de respuesta termoregulatoria a las variaciones del ITH para cada una de las 100 vacas. (Tolerante=Azul; Robusto=Negro; Sensible=Rojo).

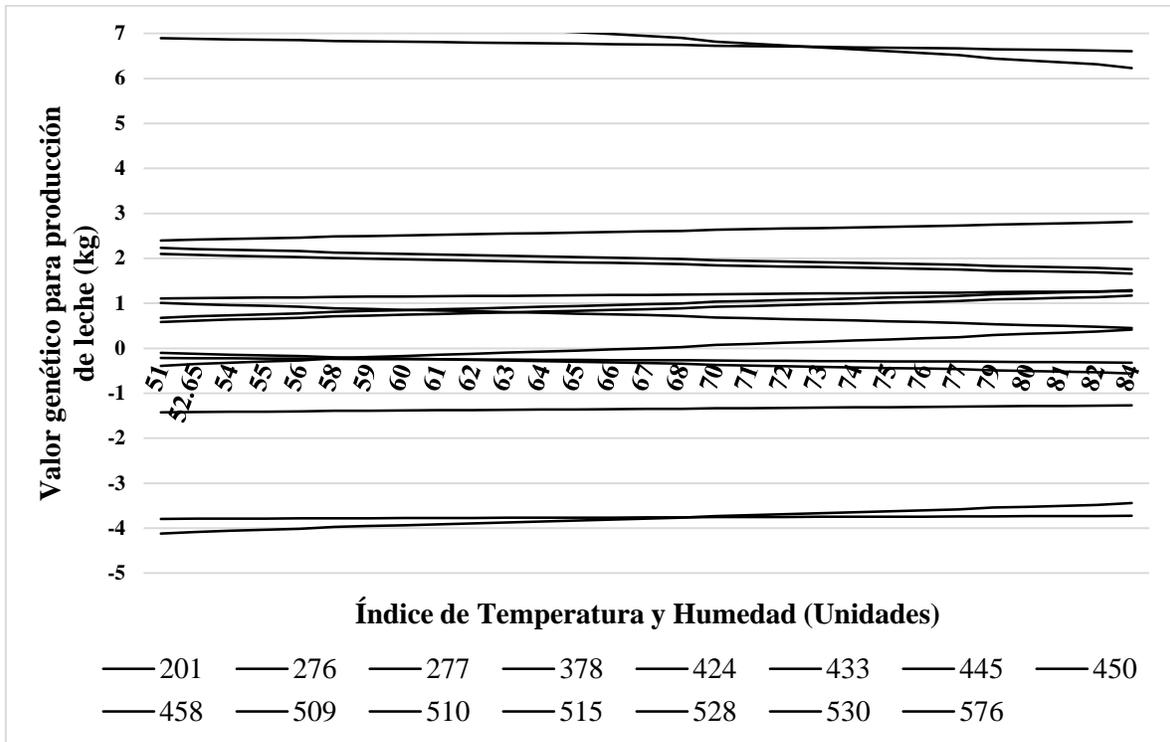
La Gráfica 8 representa una regresión de los valores genéticos para producción de leche (EBV para producción de leche) a través de los cambios climáticos (incrementos en los valores del ITH) experimentados por cada animal durante sus respectivas lactancias. Cada una de las líneas mostradas en la gráfica representa un modelo de norma de reacción que pertenece específicamente a 1 de los 100 individuos incluidos en el análisis, en color azul se muestran los animales que se consideran termotolerantes puesto que los incrementos en los niveles de ITH no merman su capacidad productiva (poseen una pendiente mayor a 0). En color negro se ilustra a los individuos cuyo resultado indica que son robustos, es decir, que los cambios en los niveles de ITH no afectan en gran medida su capacidad productiva (poseen una pendiente cercana a 0); y por último, en rojo se presenta a los individuos que poseen una marcada sensibilidad a los incrementos en los niveles de ITH, lo que significa que su capacidad productiva se ve seriamente afectada por los aumentos en los valores del ITH (poseen una pendiente menor a 0).

Los resultados del presente análisis se asemejan bastante a los reportados por Menéndez-Buxadera *et al.* (2012), quienes aplicando la misma metodología lograron identificar los mismos tipos de respuesta en cabras lecheras de las razas Murciano-Granadina y Payoya. De manera similar, Menéndez-Buxadera *et al.* (2013) y Menéndez-Buxadera *et al.* (2014) reportaron el mismo patrón de respuestas pero esta vez con cabras lecheras de la raza Murciano-Granadina y ovejas de la raza Merino de Grazalema. Los mismos autores indican que la respuesta de los animales al estrés producido por diferentes combinaciones de temperatura y humedad (mismas que son reunidas en el ITH) puede estimarse únicamente con la aplicación de modelos de norma de reacción. Es interesante notar que la respuesta termoregulatoria de los animales puede ser estimada sin la necesidad de utilizar otras mediciones fenotípicas como la TR y la FR, sin embargo, existen reportes

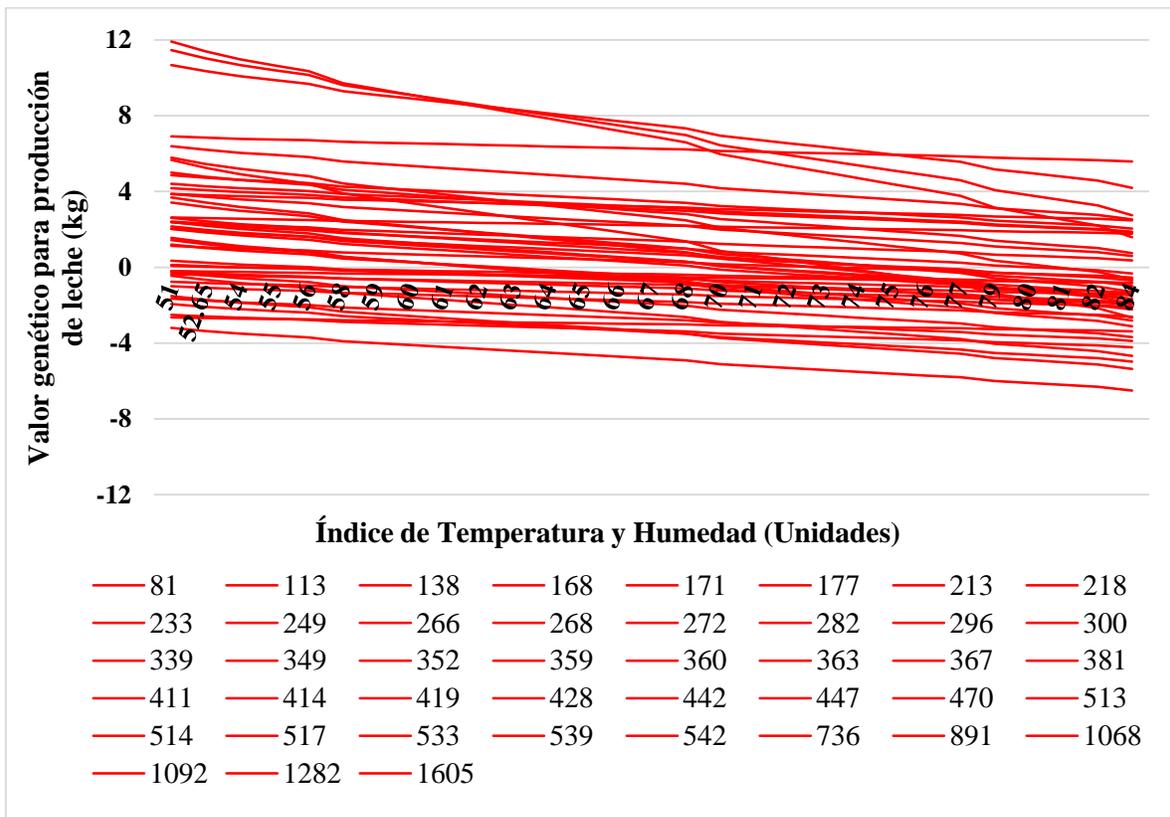
en la literatura que señalan la factibilidad de utilizar únicamente las diferencias en la producción de leche provocadas por los cambios climáticos como rasgo indicativo de la tolerancia al calor, es decir, sin la necesidad de incluir otro tipo de mediciones en el animal (McMillan y Van der Werf, 2007). En las gráficas 9, 10 y 11 se presentan respectivamente a los animales tolerantes (n=42), robustos (n=15) y sensibles (n=43) detectados en el presente estudio.



**Gráfica 9.** Animales tolerantes al estrés por calor (n=42).

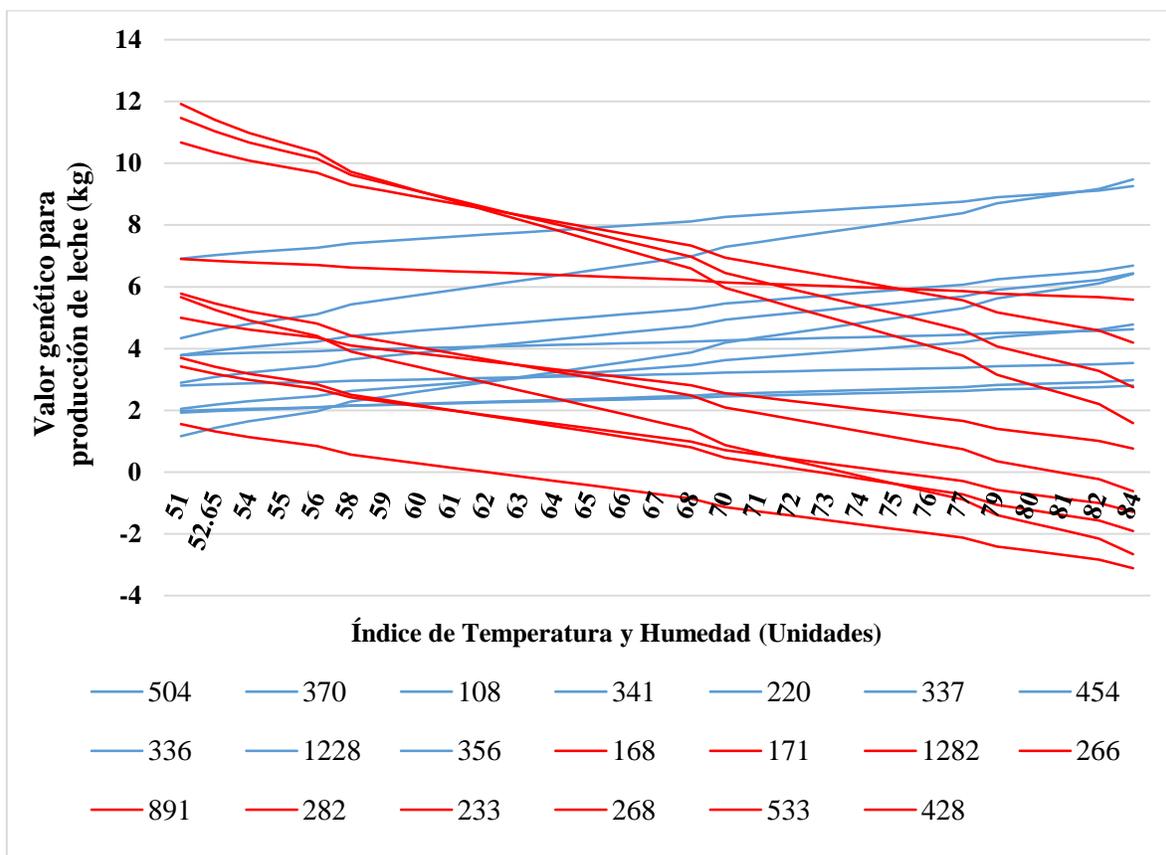


**Gráfica 10.** Animales robustos al estrés por calor (n=15).



**Gráfica 11.** Animales sensibles al estrés por calor (n=43).

En la Gráfica 12, se muestra a los animales que poseen valores genéticos para producción de leche por arriba del promedio, pero que difieren significativamente en su habilidad termoregulatoria.



**Gráfica 12.** Animales con la tolerancia y la susceptibilidad al estrés por calor más significativa (n=20).

A diferencia de los resultados obtenidos con el HTC, los modelos de norma de reacción tienen la capacidad de clasificar a los animales de acuerdo a su capacidad genética para las dos variables en cuestión, es decir, para la tolerancia al calor y para la producción de leche. La efectividad esta metodología puede comprobarse a partir de la comparación de los resultados obtenidos con el modelo de reacción de norma (Intercepto=valor genético para producción de leche y pendiente=valor genético para termotolerancia) para un

determinado individuo, con los resultados obtenidos mediante el cálculo del HTC y del PLA305 para el mismo individuo; por ejemplo, una de las vacas con mejor resultado en los modelos de norma de reacción fue la número 337, dicho animal obtuvo un valor genético para producción de leche por arriba del promedio poblacional (11.43), así como también una pendiente positiva (0.9595), lo cual nos indica que puede clasificarse como una vaca alta productora y a su vez tolerante al estrés por calor, si revisamos los resultados de esta vaca en particular en el la clasificación establecido por el HTC, encontramos que esta vaca se encuentra en la posición número 4 dentro de la clasificación, con una capacidad de disipación de calor del 72.7 % y con una PLA305 por arriba del promedio poblacional obtenido para la lactancia del 2013 (10465.3 kg de leche vs el promedio poblacional de 8786.5 kg de leche). De manera similar, es posible constatar la efectividad de los modelos de norma de reacción para evaluar tanto la termotolerancia como la productividad, a través del análisis de las vacas número 520 y 493, ambas de acuerdo al HTC poseen buena habilidad para disipar calor (73 y 72.4 %, respectivamente), sin embargo, sus resultados para PLA305 en el 2013 se encuentran muy por debajo de la media (6471.4 y 5758.6 kg de leche, respectivamente), ambas respuestas se confirman claramente en los resultados de los modelos de norma de reacción para cada animal en particular, en el caso de la vaca 520, ésta presentó un valor genético para producción de leche por debajo de la media (-5.869) y un valor genético para termotolerancia positivo (0.288), situación similar a la de la vaca 493, puesto que ésta última tuvo un valor genético para producción de leche por debajo de la media (-7.980) y un valor genético para termotolerancia positivo (0.472). En el Cuadro 6, se presentan los resultados generales de los modelos de norma de reacción para cada una de las 100 vacas incluidas en el estudio, así como su respectivo HTC y PLA305 de las lactancias 2011, 2012 y 2013.

**Cuadro 6.** Resultados generales de los modelos de norma de reacción, HTC y PLA305 2011, PLA305 2012 y PLA305 2013 para cada una de las 100 vacas del estudio.

<b>ID</b>	<b>Valor Genético para leche</b>	<b>Valor Genético para Termotolerancia</b>	<b>HTC</b>	<b>PLA305 2011</b>	<b>PLA305 2012</b>	<b>PLA305 2013</b>
81	3.1680	-1.3380	61.9	9120.1	9680.9	9015.0
108	6.6010	1.4450	67.9	7494.7	*	10819.2
113	-3.6170	-1.7250	67.9	8038.1	6963.7	9047.8
138	-4.8690	-1.5690	61.3	7396.4	7085.8	7552.8
151	-5.0040	0.0210	61.3	7907.7	5413.9	9278.7
155	-7.9430	3.8340	67.3	6219.3	*	6023.8
168	9.5450	-4.2190	55.3	11804.8	9063.3	10479.0
171	10.0500	-3.5600	65.8	10576.2	9858.4	11191.6
177	-0.9655	-1.7330	59.5	7788.7	7798.3	8726.9
201	1.0300	-0.2300	52.6	8888.8	8001.5	9997.9
213	-3.9070	-0.9123	56.5	9333.8	5725.3	7141.8
218	0.5151	-1.6630	63.1	7431.8	7777.0	9257.6
220	4.8300	1.1140	56.2	8947.7	9056.2	9804.6
233	1.5020	-1.9210	58.6	8398.4	7832.2	8071.4
249	4.4430	-1.0370	61.3	8448.2	8412.5	9131.8
266	10.5100	-2.6470	56.8	9906.3	9914.2	11512.3
268	-1.1050	-1.9050	69.4	7796.7	7083.1	9380.9
272	-1.5460	-0.7070	45.7	6879.4	7688.7	7438.0
276	9.5480	-0.1190	59.2	8624.3	*	10988.0
277	0.0174	0.3312	54.1	7095.1	8756.7	8812.4
282	1.2600	-2.2880	61	6430.7	6172.5	11893.0
296	-1.2870	-0.4510	54.1	7993.9	7281.8	8144.1
300	-1.0840	-0.9144	58	6930	8807.0	8282.8
322	-5.8870	1.3760	68.2	5442.2	*	6837.9
324	-6.3240	2.4320	65.2	6246	6282.9	6739.5
336	5.9470	0.3438	68.2	9174.6	9684.5	8700.6
337	11.4300	0.9595	72.7	9553.2	10664.8	10465.3
339	-6.8590	-1.3550	68.2	6169.7	5661.4	8214.7
341	7.4060	1.1820	63.7	9158	9338.9	9969.8
349	-0.7188	-0.2611	49.9	*	7056.0	8574.7
352	-4.8860	-1.2420	48.4	6676.5	6072.6	8421.9
356	4.4810	0.2999	63.7	8336.7	8798.4	9587.3
359	1.4510	-1.0990	52.3	7624.4	7006.5	10690.6
360	0.2242	-1.5280	65.2	7353.6	6581.4	10431.7
361	-3.7120	1.0710	65.5	6779.8	7688.0	7894.1
363	-0.5363	-0.3708	67.9	6818.6	*	9513.9
366	-0.8099	1.5870	58	7170.6	7796.0	7791.0
367	-2.5510	-0.6579	72.1	7239.1	6437.8	8158.3
370	9.7660	2.1020	65.5	*	9403.5	11033.4
378	1.3960	0.2512	72.4	6204.6	*	9536.9
381	0.4903	-1.4820	64	5577.7	8065.9	8395.1

<b>ID</b>	<b>Valor Genético para leche</b>	<b>Valor Genético para Termotolerancia</b>	<b>HTC</b>	<b>PLA305 2011</b>	<b>PLA305 2012</b>	<b>PLA305 2013</b>
402	-7.6990	0.6508	65.8	5948.5	6573.6	7409.5
410	-5.3340	1.4940	64.9	5740.6	6787.8	7720.8
411	-0.8522	-0.6034	68.2	*	7056.5	7446.3
414	4.8820	-1.1550	53.5	7176.9	8703.6	9780.0
419	-2.7920	-1.3990	70.9	8062.5	7458.7	6612.4
421	0.3805	2.3520	64.3	6813.8	9016.0	8861.0
424	3.6840	0.1706	47.2	7250.1	8445.3	10197.0
428	8.8290	-0.5415	55.3	10008.7	9726.9	10123.4
433	-0.4709	-0.1892	61.3	6947	7286.8	9148.6
442	4.4910	-0.5737	55.3	7669.3	8178.6	9088.2
445	1.2430	0.2410	63.4	7372.5	8438.0	8189.3
447	3.1210	-0.3485	65.8	*	7340.9	9771.9
450	9.7900	-0.5652	68.8	8798.4	10076.6	10192.6
454	3.4670	0.4294	55.3	7848.5	9125.3	9720.3
458	-0.3772	-0.0421	69.4	6919.3	8070.4	8867.1
460	-1.2940	1.5470	66.76	7509.4	8051.0	8556.4
461	-0.2505	0.5846	63.1	*	6634.5	9053.8
463	-1.9440	1.4980	70.3	7030	7282.8	9038.8
465	-1.0200	1.0040	59.8	7269	7999.4	8145.3
470	4.2700	-0.9508	65.5	8524.1	9087.2	9827.6
484	-3.7930	1.1340	31.9	6604.3	6273.9	7034.6
493	-7.9800	0.4720	72.4	4693.2	5815.6	5758.6
504	5.3670	2.1450	65.5	8241	8523.4	10241.9
508	-1.4190	1.7400	59.5	7677.1	7328.5	8178.6
509	2.6560	-0.1776	63.7	7133.1	*	9568.8
510	-1.9050	0.0654	64.9	8579.2	5433.6	9233.9
512	-3.4640	0.2815	68.8	6270.8	7582.7	7572.5
513	0.4208	-0.6855	61.3	8184.7	7100.2	8685.5
514	1.1520	-1.4640	54.4	8177.6	7678.4	8882.6
515	-5.3190	0.0278	61	7694.1	6129.3	7194.5
517	0.9520	-1.1140	52.9	7700.3	7562.4	9554.2
519	-3.8310	0.6452	64.9	7212.9	6387.2	8349.9
520	-5.8690	0.2880	73	6674.4	7197.7	6471.4
526	-2.8860	1.6070	65.8	6902	5899.4	9071.6
528	2.8200	-0.1931	60.1	8056.3	8038.0	8377.9
530	1.6830	0.0685	77.5	7673	7535.2	9344.5
531	-3.3920	2.8440	61.6	5684.6	6730.1	6642.3
533	4.0690	-1.7320	64	7585.6	8833.6	9095.3
536	-5.5730	1.7740	65.2	6268.5	6726.4	8218.5
537	1.2900	1.4220	61.3	7545.2	*	9350.6
539	1.9650	-0.8378	62.5	8494.1	8004.8	10276.9
542	6.3170	-1.5780	50.8	8254.6	*	10912.4
545	0.4694	1.7120	62.5	7831.6	8799.2	9229.8
555	-8.0460	2.0860	56.2	6537.6	*	6282.5

<b>ID</b>	<b>Valor Genético para leche</b>	<b>Valor Genético para Termotolerancia</b>	<b>HTC</b>	<b>PLA305 2011</b>	<b>PLA305 2012</b>	<b>PLA305 2013</b>
557	1.3770	1.0670	60.4	6712.3	9131.8	9424.1
565	-4.4400	3.4620	66.4	6374.2	*	8800.1
570	-5.6220	1.6030	45.4	5543.8	*	7093.6
576	-5.3460	0.2761	65.8	*	5936.1	8202.8
586	-0.8574	1.5880	71.8	5847.7	8049.9	8334.9
606	-3.0610	3.1080	58.9	6185.5	8014.5	8047.5
736	-2.0080	-0.5450	66.7	8856.1	7205.1	7383.9
891	3.6480	-2.6130	59.5	10423.9	9237.4	9241.6
1068	-4.7540	-0.6965	74.8	7560.9	5235.7	9379.1
1077	-7.6410	1.1500	65.5	6804.5	6487.5	6864.5
1092	-4.2490	-0.3012	61.6	6909.7	7341.6	5262.0
1228	3.3770	0.3380	66.1	*	*	9901.6
1282	2.1270	-3.3970	60.4	7709	7485.7	10175.1
1418	-1.9950	1.1980	58.9	7341.3	7666.7	7842.8
1605	-0.7219	-1.3950	70	7810.4	7002.6	8472.5

\*Sin lactancia.

Además de lo antes mencionado, otro aspecto importante revelado por los modelos de norma de reacción y que concuerda con lo expuesto por Menéndez-Buxadera *et al.* (2014), es que no todos los animales seleccionados en base a su valor genético para producción de leche calculado en la zona de confort (ITH <72 unidades), resultan ser los animales que se desempeñan mejor bajo condiciones de estrés por calor (ITH >72 unidades); dicho resultado encuentra su fundamento biológico en que existe una importante interacción entre el genotipo y el ambiente (estrés por calor), misma que se ve reflejada en importantes cambios en la productividad del ganado cuando se encuentra sometido a condiciones climáticas estresantes tales como el estrés por calor (Sahota y Gill; 1991; Ravagnolo y Misztal, 2000; Hayes *et al.*, 2003).

De manera general, los resultados del presente estudio concuerdan con los reportados por otros autores que realizaron sus investigaciones en pequeños rumiantes (Menéndez-Buxadera *et al.*, 2012; Menéndez-Buxadera *et al.*, 2013; Menéndez-Buxadera *et al.*, 2014), lo que indica que independientemente de la especie productiva a evaluar, los

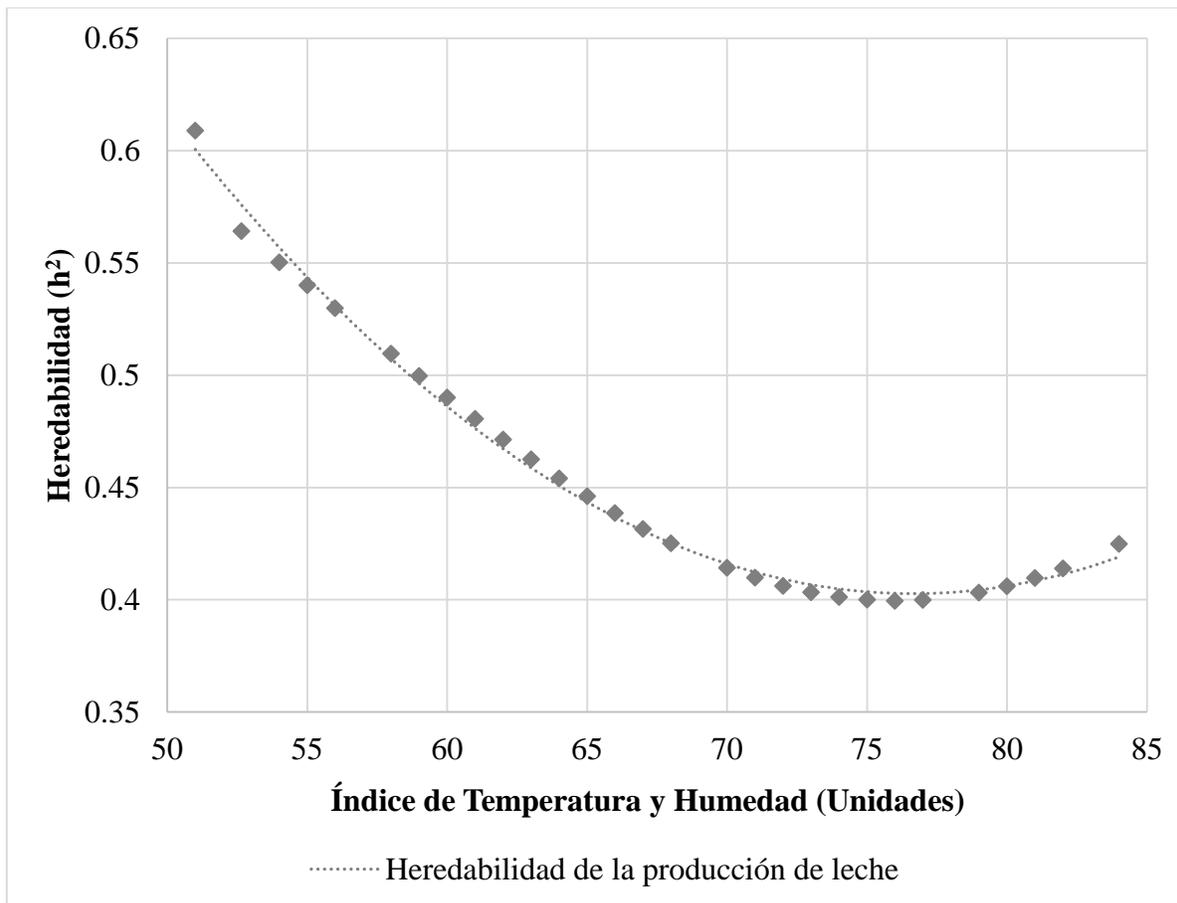
modelos de norma de reacción tienen el potencial de estimar la interacción genotipo x ambiente de tal forma que pueden caracterizar los distintos tipos de respuesta existentes entre los individuos de una población ante condiciones patológicas inducidas por el ambiente. En el caso específico del estrés por calor, Collier *et al.* (2006) señalan que las nuevas estimaciones entre las interacciones genéticas y medio ambientales, soportan el uso de herramientas biotecnológicas recientemente disponibles para identificar la base genética de la susceptibilidad o la tolerancia al estrés por calor. En este sentido, la posibilidad de identificar de manera precisa las diferentes respuestas termoregulatorias y productivas en el ganado abre paso a la posibilidad de implementar herramientas conocidas como “microarreglos de ADN” (comúnmente llamados SNP-BeadChips), que permiten interrogar de forma simultánea miles de posiciones declaradas como SNPs a través de todo el genoma, con el objetivo de localizar a aquellos que contribuyen a la variación genética natural ambos rasgos (Matukumalli *et al.*, 2009; Pareek *et al.*, 2011).

El uso de modelos de norma de reacción como indicadores fenotípicos y su efectividad para utilizarlos en estudios para encontrar genes involucrados en las habilidades termoregulatoria y productiva del ganado fue puesta a prueba por Zidi *et al.* (2014), quienes desarrollaron un estudio asociativo de genoma completo para determinar la arquitectura genética de la tolerancia al estrés de calor en cabras lecheras de la raza Florida. Como resultado general de dicha investigación, fueron identificados varios SNPs significativos involucrados en la composición de la leche como el de la kappa caseína (CSN3) y el acetil-coenzima A carboxilasa alfa (ACACA), así como también el SNP “snp39045-scaffold-3419” localizado en el intrón 2-3 del gen de la proteína asociada a la proteína de choque térmico de 27 kDa (HSPBAP1), que se encuentra involucrado con la regulación de la acción de la proteína de choque térmico 27 (HSP27), que se caracteriza por proteger a las

células en contra de la apoptosis y asegurar la supervivencia de las células bajo diversas condiciones de estrés por calor.

#### 4.5 Heredabilidad para producción de leche bajo condiciones de estrés por calor

Los valores estimados para la heredabilidad ( $h^2$ ) en producción de leche a través de la escala del ITH se presentan en la Gráfica 13. La  $h^2$  resultó ser mayor cuando el ITH se encuentra por debajo del límite de confort térmico del ganado ( $\leq 72$  unidades, Armstrong, 1994), declinando de manera abrupta y significativa a medida aumentan los valores los valores del ITH.

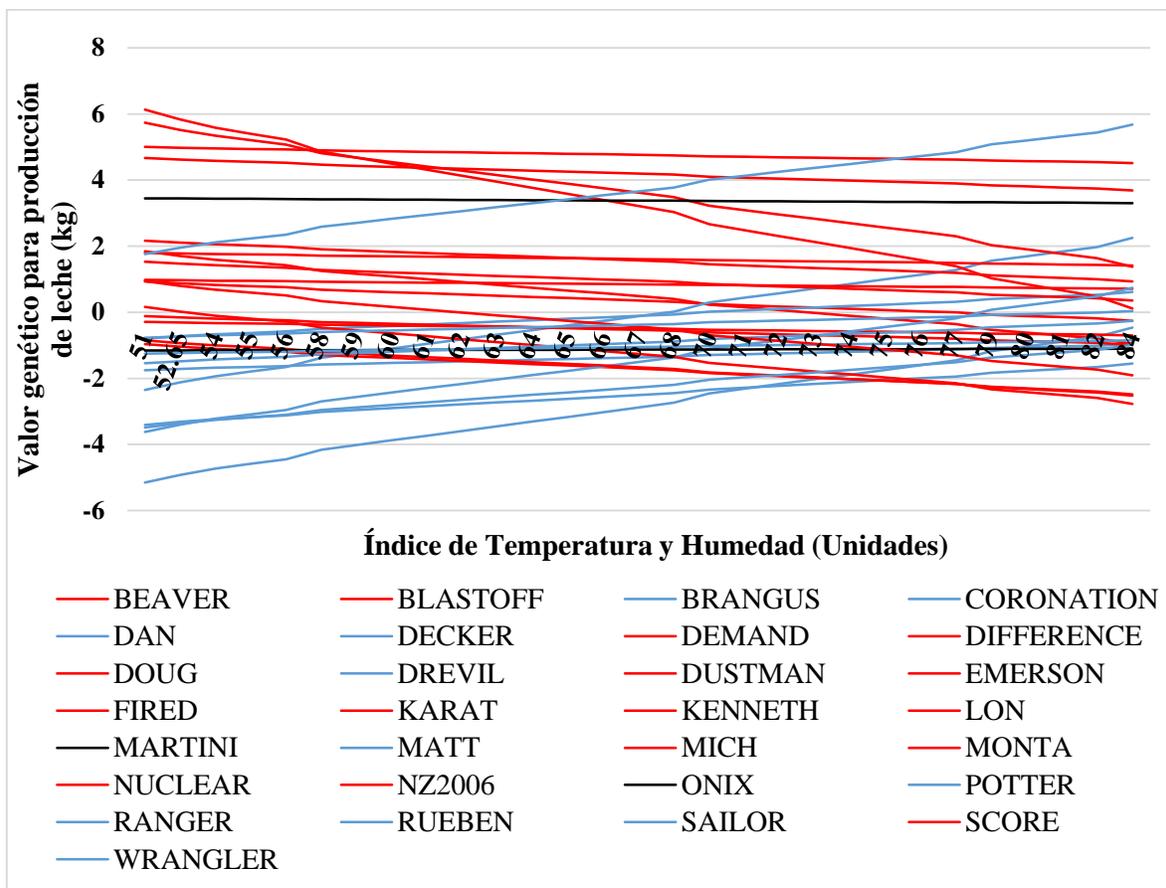


**Gráfica 13.** Heredabilidad de la producción de leche a través de la trayectoria del Índice de Temperatura y Humedad.

Los resultados para los estimados de  $h^2$  para producción de leche del presente estudio se encuentran por encima de los valores reportados en la literatura para dicho caracter (Ali y Scheaffer, 1987; Peña *et al.*, 2007); lo anterior podría encontrar una explicación en que las estimaciones del presente estudio se encuentren sesgadas debido al pequeño número de animales incluidos en la investigación, así como por la falta de uniformidad en la distribución de la cantidad de registros productivos disponibles para cada punto en la escala del ITH (ver Gráfica 4). Dominguez-Viveros *et al.* (2011) reportaron una situación similar en la cual los cambios en resultados de la  $h^2$  para el intervalo entre el peso al nacimiento y el peso a los 7 meses de edad en bovinos de carne, se debían a una sobreestimación de la varianza residual para ese periodo y por la poca información incluida en el estudio.

#### **4.6 Clasificación de los toros de acuerdo a su potencial genético para producción de leche y para termotolerancia**

Debido a las relaciones parentales establecidas por el pedigrí a través de la aplicación de modelos de norma de reacción, también es factible realizar una evaluación de la aptitud productiva y de la termotolerancia de los progenitores de las 100 vacas originalmente incluidas en el estudio. En la Gráfica 14 se muestran los diferentes tipos de respuesta presentados por los 29 toros dentro del pedigrí ante las variaciones de los valores del ITH.



**Gráfica 14.** Tipos de respuesta a las variaciones de los valores del ITH para cada toro del pedigrí (Tolerante=Azul; Robusto=Negro; Sensible=Rojo).

En el Cuadro 7 se muestran los resultados generales para cada toro dentro del pedigrí. Muchos de ellos poseen solamente una hija, situación que se traduce en una disminución de la confiabilidad en las estimaciones obtenidas por el modelo de norma de reacción, sin embargo, cabe mencionar que el total de la población analizada también es muy pequeño ( $n=100$ ), por lo que naturalmente sería poco probable contar con mucha descendencia para cada uno de los toros. En este conjunto de datos, solo existe uno que posee buenos potenciales genéticos tanto para producción de leche como para termotolerancia, dicho toro, cuyo nombre es Rueben, precisamente es el progenitor de dos de las mejores vacas analizadas previamente (padre de las vacas 337 y 341), mismas que

sobresalieron notoriamente del resto de los animales al poseer los valores genéticos más altos para producción de leche y termotolerancia.

**Cuadro 7.** Potenciales genéticos para producción de leche, termotolerancia y clasificación de la repuesta termoregulatoria para los 29 toros del pedigrí.

<b>Semental</b>	<b>Potencial lechero (EBV<sup>1</sup>)</b>	<b>Potencial de termotolerancia (EBV<sup>1</sup>)</b>	<b>Clase</b>	<b>No de Hijas</b>	<b>T<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>3</sup></b>	<b>S<sup>4</sup></b>
Beaver	0.6300	-1.1440	S	1	0	0	1
Blastoff	0.4793	-0.4870	S	3	1	0	2
Brangus	-1.9160	0.3226	T	1	1	0	0
Coronation	-3.9710	1.9170	T	1	1	0	0
Dan	-0.1275	0.5777	T	6	2	2	2
Decker	-0.0690	1.8800	T	2	2	0	0
Demand	5.0250	-1.7800	S	1	0	0	1
Difference	2.2700	-0.1576	S	2	1	0	1
Doug	6.7270	-0.1986	S	4	0	3	1
Drevil	-3.5020	0.7582	T	2	2	0	0
Dustman	1.1940	-0.1117	S	2	1	0	1
Emerson	-0.7010	-0.1705	S	1	0	0	1
Fired	5.9090	-0.4010	S	3	1	0	2
Karat	4.4190	-2.4560	S	2	0	0	2
Kenneth	-2.4430	-0.6208	S	1	0	0	1
Lon	1.3300	-0.4785	S	7	1	3	3
Martini	4.7740	-0.0595	R	1	0	1	0
Matt	-2.0340	1.7790	T	4	3	1	0
Mich	-0.7728	-0.3535	S	1	0	0	1
Monta	-2.3880	-0.6848	S	2	1	0	1
Nuclear	2.1900	-0.5068	S	2	0	1	1
NZ2006	-1.8450	-1.1980	S	10	3	0	7
Onix	-1.5960	0.0223	R	4	2	0	2
Potter	-3.1580	1.0190	T	2	2	0	0
Ranger	-1.4830	0.1676	T	3	0	1	2
Rueben	5.2550	1.5990	T	2	2	0	0
Sailor	-1.2780	0.5226	T	17	9	2	6
Score	-0.6803	-1.1630	S	2	0	0	2
Wrangler	-0.5159	0.3309	T	4	2	1	1

<sup>1</sup> Valor Genético (Estimated Breeding Value)

<sup>2</sup> Tolerante

<sup>3</sup> Robusto

<sup>4</sup> Sensible

Al observar el cuadro, varios de los resultados concuerdan con los reportes en la literatura que indican que la producción de leche y la termotolerancia son caracteres antagónicos (Ravagnolo y Misztal, 2000), puesto que la mayor parte de los toros que poseen un potencial productivo positivo, también poseen un potencial de termotolerancia negativo; sin embargo, existen casos particulares muy interesantes, como en el caso de los toros Doug, Fired y Martini, los cuales poseen muy buenos potenciales productivos a pesar de tener un potencial para termotolerancia negativo, aunque éste último no es tan extremo.

## V. CONCLUSIÓN

La estimación de la interacción genotipo x ambiente a través de la utilización de modelos de norma de reacción hizo posible identificar diferentes patrones de respuestas productivas y termoregulatorias en el ganado estudiado. Puntualmente fue posible identificar a los animales que muestran prácticamente el mismo rendimiento productivo independientemente de las variaciones en el ITH (animales robustos). También se identificaron animales tolerantes y no tolerantes al estrés por calor con base al tipo fluctuaciones en su rendimiento lechero a medida que ocurren incrementos en los valores del ITH.

Adicionalmente, también se concluye que no todos los animales seleccionados en base a su valor genético para producción de leche calculado en la zona de confort (ITH <72 unidades), resultan ser los animales que se desempeñan mejor bajo condiciones de estrés por calor (ITH >72 unidades). La importante interacción genotipo x ambiente obtenida se refleja en cambios sustanciales en la productividad del ganado cuando se encuentra bajo condiciones de estrés calórico.

De manera general, se concluye que los resultados obtenidos a partir de la implementación de modelos de norma de reacción son buenos indicadores fenotípicos de las habilidades termoregulatoria y productiva del ganado Holstein.

## ANEXO 1

**Cuadro 8.** Pedigrí conformado por 100 vacas Holstein hijas de 29 toros y 83 vacas.

ID HIJA	ID TORO	ID VACA	ID HIJA	ID TORO	ID VACA
324	ND*	NZ717	576	MATT	154
339	ND*	NZ1525	272	MICH	10
470	ND*	265	151	MONTA	7456
484	ND*	273	177	MONTA	14
493	ND*	303	201	NUCLEAR	28
504	ND*	253	249	NUCLEAR	148
555	ND*	334	360	NZ2006	ND*
282	BEAVER	1672	736	NZ2006	ND*
213	BLASTOFF	2036	891	NZ2006	ND*
218	BLASTOFF	93	1068	NZ2006	ND*
220	BLASTOFF	114	1077	NZ2006	ND*
519	BRANGUS	326	1092	NZ2006	ND*
155	CORONATION	240	1228	NZ2006	ND*
510	DAN	NZ891	1282	NZ2006	ND*
530	DAN	125	1418	NZ2006	ND*
536	DAN	NZ392	1605	NZ2006	ND*
539	DAN	NZ437	268	ONIX	54
542	DAN	157	359	ONIX	2393
606	DAN	376	361	ONIX	58
421	DECKER	72	366	ONIX	175
465	DECKER	113	570	POTTER	366
171	DEMAND	256	586	POTTER	313
336	DIFFERENCE	72	277	RANGER	182
349	DIFFERENCE	64	296	RANGER	177
424	DOUG	188	300	RANGER	81
428	DOUG	36	337	RUEBEN	108
445	DOUG	139	341	RUEBEN	171
450	DOUG	20	322	SAILOR	77
520	DREVIL	234	356	SAILOR	200
526	DREVIL	NZ1657	378	SAILOR	223
108	DUSTMAN	7467	381	SAILOR	232
113	DUSTMAN	738	402	SAILOR	NZ698
363	EMERSON	201	410	SAILOR	84
266	FIRED	132	411	SAILOR	NZ1299
367	FIRED	179	414	SAILOR	NZ1224
370	FIRED	107	419	SAILOR	NZ1068
168	KARAT	829	442	SAILOR	200
233	KARAT	116	447	SAILOR	175
352	KENNETH	197	454	SAILOR	248
433	LON	3	458	SAILOR	81
514	LON	213	460	SAILOR	201
515	LON	NZ708	461	SAILOR	277
517	LON	NZ1571	463	SAILOR	288
528	LON	NZ698	531	SAILOR	310
533	LON	2420	81	SCORE	23
545	LON	200	138	SCORE	33
276	MARTINI	2384	508	WRANGLER	NZ472
537	MATT	NZ1538	509	WRANGLER	NZ412
557	MATT	185	512	WRANGLER	NZ760
565	MATT	159	513	WRANGLER	NZ17

\*ND = No Disponible

## LITERATURA CITADA

- Ajeet, K., and K. Meena. 2011. Effect of heat stress in tropical livestock and different strategies for its amelioration. *J. Stress Physiol. Biochem.* 7:46-54.
- Ali, T. E., and L. R. Schaeffer. 1987. Accounting for covariances among test day milk yields in dairy cows. *Can. J. Anim. Sci.* 67:637-644.
- Aréchiga, C. F., C. R. Staples, L. R. McDowell and P. J. Hansen. 1998. Effects of timed insemination and supplemental  $\beta$ -carotene on reproduction and milk yield of dairy cows under heat stress. *J. Dairy Sci.* 81:390-402.
- Arias, R. A., T. L. Mader and P. C. Escobar. 2008. Factores climáticos que afectan el desempeño productivo del ganado bovino de carne y leche. *Arch. Med. Vet.* 40:7-22.
- Armstrong, D. V. 1994. Heat stress interaction with shade and cooling. *J. Dairy Sci.* 77:2044-2050.
- Armstrong, D. V. 2000. Methods to reduce heat stress for dairy cow. In Proc. of Heart of America Dairy Management Conference. Kansas State University, Manhattan, Kansas, June 21-22. 13-19.
- Página web:  
[http://jokko.bae.uky.edu/ext/Livestock/Dairy/PDFs/KSU\\_heatstress.pdf#page=12](http://jokko.bae.uky.edu/ext/Livestock/Dairy/PDFs/KSU_heatstress.pdf#page=12)  
Recuperado: 30/12/2015.
- Avendaño-Reyes, L., F. D. Álvarez-Valenzuela, A. Correa-Calderón, J. S. Saucedo-Quintero, P. H. Robinson, and J. G. Fadel. 2006. Effect of cooling Holstein cows during the dry period on postpartum performance under heat stress conditions. *Livest. Sci.* 105:198-206.

- Baccari Jr., F., 1986. Métodos e técnicas de avaliação de adaptabilidade às condições tropicais. Proceedings of the 1st International Symposium on Animal Bioclimatology in the Tropics: Small and Large Ruminants. Fortaleza, Brazil. 9–17.
- Badinga, L., R. J. Collier, W. W. Thatcher and C. J. Wilcox. 1985. Effects of climatic and management factors on conception rate of dairy cattle in subtropical environment. *J. Dairy Sci.* 68:78-85.
- Banos, G., and G. E. Shook. 1990. Genotype by environment interaction and genetic correlations among parities for somatic cell count and milk yield. *J. Dairy Sci.* 73:2563-2573.
- Beede, D. K. and R. J. Collier. 1986. Potential nutritional strategies for intensively managed cattle during thermal stress. *J. Anim. Sci.* 62:543–554.
- Beilharz, R. G., B. G. Luxford and J. L. Wilkinson. 1993. Quantitative genetics and evolution: is our understanding of genetics sufficient to explain evolution? *J. Anim. Breed. Genet.* 110:161-170.
- Bernabucci, U., S. Biffani, L. Buggiotti, A. Vitali, N. Lacetera, and A. Nardone. 2014. The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 97:471-486.
- Bohmanova, J., I. Misztal and J. B. Cole. 2007. Temperature-humidity indices as indicators of milk production losses due to heat stress. *J. Dairy Sci.* 90:1947-1956.
- Bouraoui, R., M. Lahmar, A. Majdoub, M. N. Djemali and R. Belyea. 2002. The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate. *Animal Research.* 51: 479-491.

- Brosh, A., Y. Aharoni, A. A. Degen, D. Wright and B. A. Young. 1998. Effects of solar radiation, dietary energy, and time of feeding on thermoregulatory responses and energy balance in cattle in a hot environment. *J. Anim. Sci.* 76:2671-2677.
- Buckley, F., K. O'sullivan, J. F. Mee, R. D. Evans and P. Dillon. 2003. Relationships among milk yield, body condition, cow weight, and reproduction in spring-calved Holstein-Friesians. *J. Dairy Sci.* 86:2308-2319.
- Buffington, D. E., A. Collazo-Arocho, G. H. Canton and D. Pitt. 1981. Black globe-humidity index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. *Trans. ASAE* 24:711-714.
- Burfeind, O., M. A. G. Von Keyserlingk, D. M. Weary, D. M. Veira and W. Heuwieser. 2010. Short communication: Repeatability of measures of rectal temperature in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 93:624-627.
- Cammack, K. M., E. Antoniou, L. Hearne and W. R. Lamberson. 2009. Testicular gene expression in male mice divergent for fertility after heat stress. *Theriogenology.* 71:651-661.
- Carabaño, M. J., K. Bachagha, M. Ramón and C. Díaz. 2014. Modeling heat stress effect on Holstein cows under hot and dry conditions: Selection tools. *J. Dairy Sci.* 97:7889-7904.
- Charoensook, R., K. Gatphayak, A. R. Sharifi, C. Chaisongkram, B. Brenig and C. Knorr. 2012. Polymorphisms in the bovine HSP90AB1 gene are associated with heat tolerance in Thai indigenous cattle. *Trop. Anim. Health Prod.* 44: 921-928.
- Choshniak, I., D. M. Jenkinson, D. R. Blatchford and M. Peaker. 1982. Blood flow and catecholamine concentration in bovine and caprine skin during thermal sweating.

Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Comparative Pharmacology, 71:37-42.

Collier, R. J., G. E. Dahl and M. J. VanBaale. 2006. Major Advances Associated with Environmental Effects on Dairy Cattle. *J. Dairy Sci.* 89:1244–1253.

Collier, R. J., and R. B. Zimbelman. 2007. Heat stress effects on cattle: What we know and what we don't know. In *Proc. of the Southwest Nutrition and Management Conference*. Tempe, Arizona, USA, February 22-23. 76-83. Página Web:

{HYPERLINK

"[http://ag.arizona.edu/ans/swnmc/Proceedings/2007/Collier\\_2007SWNMC.pdf](http://ag.arizona.edu/ans/swnmc/Proceedings/2007/Collier_2007SWNMC.pdf)"}

Recuperado el: 13-12-2015.

Collier, R. J., J. L. Collier, R. P. Rhoads and L. H. Baumgard. 2008. Invited review: genes involved in the bovine heat stress response. *J. Dairy Sci.* 91:445-454.

Comisión Nacional de Población (CONAPO). 2014. Estimaciones y proyecciones de la población por entidad federativa, Sonora. Página Web:

{HYPERLINK "[http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones\\_Datos](http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos)"}

Recuperado el: 08-04-2015.

Cony, P., G. A. Casagrande y G. T. Vergara. 2004. Cuantificación de un índice de estrés calórico para vacas lecheras en Anguil, provincia de La Pampa, Argentina. *Rev. Fac. Agronomía.* 15:9-15.

Coppock, C. E. 1985. Energy nutrition and metabolism of the lactating dairy cow. *J. Dairy Sci.* 68:3403–3410.

Correa-Calderón, A., D. Armstrong, D. Ray, S. DeNise, M. Enns, and C. Howison. 2004. Thermoregulatory responses of Holstein and Brown Swiss heat-stressed dairy cows to two different cooling systems. *Int. J. Biometeorol.* 48:142-148.

- Council on Dairy Cattle Breeding (CDCB). 2015. Bovine genetic trends: trend in milk breeding value for Holstein or red and white. Página Web: {HYPERLINK “<https://www.cdcb.us/eval/summary/trend.cfm>”}
- Recuperado el: 15-06-2015.
- Da Silva, R. G. 2006. Weather and climate and animal production. Update of the guide to agricultural meteorological practices. 563-567.
- De Jong G. 1990. Quantitative genetics of reaction norms. *J. Evol. Biol.* 3:447–468.
- De Jong, G., and P. Bijma. 2002. Selection and phenotypic plasticity in evolutionary biology and animal breeding. *Livest. Prod. Sci.* 78, 195–214.
- De Rensis, F. and R. J. Scaramuzzi. 2003. Heat stress and seasonal effects on reproduction in the dairy cow—a review. *Theriogenology.* 60:1139-1151.
- Dikmen, S., E. Alava, E. Pontes, J. M. Fear, B. Y. Dikmen, T. A. Olson and P. J. Hansen. 2008. Differences in thermoregulatory ability between slick-haired and wild-type lactating Holstein cows in response to acute heat stress. *J. Dairy Sci.* 91:3395-3402.
- Dikmen, S., J. B. Cole, D. J. Null and P. J. Hansen. 2012. Heritability of rectal temperature and genetic correlations with production and reproduction traits in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 95:3401-3405.
- Dikmen, S., J. B. Cole, D. J. Null and P. J. Hansen. 2013. Genome-wide association mapping for identification of quantitative trait loci for rectal temperature during heat stress in Holstein cattle. *Plos One.* 87: e69202.
- Dikmen, S., F. A. Khan, H. J. Huson, T. S. Sonstegard, J. I. Moss, G. E. Dahl and P. J. Hansen. 2014. The SLICK hair locus derived from Senepol cattle confers thermotolerance to intensively managed lactating Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 97:5508-5520.

- Domínguez-Viveros, J., F. A. Rodríguez-Almeida, R. Nuñez-Domínguez, J. A. Ortega-Gutiérrez, R. Ramírez-Valverde, E. Santellano-Estrada, y J. L. Espinosa-Villavicencio. 2011. Ajuste de modelos de regresión aleatoria en evaluaciones genéticas de bovinos Tropicarne. *Agrociencia*. 45:325-337.
- Du Preez, J. H., W. H. Giesecke and P. J. Hattingh. 1990. Heat stress in dairy cattle and other livestock under southern African conditions. I. Temperature-humidity index mean values during the four main seasons. *Onderstepoort J. Vet. Res.* 57: 77-87.
- Ealy, A. D., M. Drost, C. M. Barros and P. J. Hansen. 1992. Thermoprotection of preimplantation bovine embryos from heat shock by glutathione and taurine. *Cell Biol. Int. Repr.* 16:125-131.
- Edmonson, A. J., I. J. Lean, L. D. Weaver, T. Farver and G. Webster. 1989. A body condition scoring chart for Holstein dairy cows. *J. Dairy Sci.* 72:68-78.
- Enns, R. M., B. W. Brigham, C. M. McAllister and S. E. Speidel. 2011. Evidence of genetic variability in cattle health traits: Opportunities for Improvement. Proc. 43rd Annu. Mtg. of the Beef Improv. Fed., Bozeman, Montana, USA, June 1-4. 22-26.
- Filho, K. E., G. R. Figueredo, R. G. O. Alves and L. O. C. Silva. 1999. Efeitos genéticos aditivos direto e materno sobre o peso à desmama em animais mestiços europeu zebu. *Rev. Bras. Zootec.* 28:275-278.
- Finch, V. A. 1984. Heat as a stress factor in herbivores under tropical conditions. In: Gilchrist F.M.C. and Mackie R.I. (eds), *Herbivore Nutrition in the Subtropics and Tropics*. 89-105.
- Finch, V. A. 1986. Body temperature in beef cattle: its control and relevance to production in the tropics. *J. Anim. Sci.* 62:531-542.

- Finocchiaro, R., J. B. C. H. M Van Kaam, B. Portolano and I. Misztal. 2005. Effect of heat stress on production of Mediterranean dairy sheep. *J. Dairy Sci.* 88:1855-1864.
- Fuquay, J. W. 1981. Heat Stress as it affects animal production. *J. Anim. Sci.* 52:164-174.
- García, A. D. 2004. *Combatiendo el estrés calórico en la vaca lechera*. College of Agriculture and Biological Sciences / South Dakota State University / USDA.
- Gaughan, J. B., N. Lacetera, S. E. Valtorta, H. H. Khalifa, L. Hahn and T. Mader T 2009. Response of domestic animals to climate challenges. In *Biometeorology of adaptation to climate variability and change* (ed. KL Ebi, I Burton and GR McGregor), Springer Science, Heidelberg, Germany. 131–170.
- Georges, M., D. Nielsen, M. Mackinnon, A. Mishra, R. Okimoto, A. T. Pasquino, L. S. Sargeant, A. Sorensen, M. R. Steele, X. Zhao, J. E. Womack and I. Hoeschele. 1995. Mapping quantitative trait loci controlling milk production in dairy cattle by exploiting progeny testing. *Genetics* 139:907-920.
- Ghosal, A. K. and G. N. Matur. 1992. Zinc copper and iron contents of blood serum of cattle sheep in semi-arid tract of Rajasthan Indian. *J. Anim. Sci.* 62:441-442.
- Gilmour, A. R., B. J. Gogel, B. R. Cullis and R. Thompson. 2009. *ASReml User Guide Release 3.0*. VSN International, Hemel Hempstead, UK.
- Goddard, M. E. and R. G. Beilharz. 1977. Natural selection and animal breeding. *Proc. 3rd Int. Congr. S.A.B.R.A.O., Animal Breeding Papers.* 4.19-4.21.
- Gómes da Silva, R. 1973. Improving tropical beef cattle by simultaneous selection for weight and heat tolerance. Heritabilities and correlations of the traits. *J. Anim. Sci.* 37:637-642.
- Hahn, G. L. 1999. Dynamic responses of cattle to thermal heat loads. *J. Anim. Sci.* 79 (Suppl. 2):10-20.

- Hammami, H., J. Bormann, N. M'hamdi, H. H. Montaldo and N. Gengler. 2013. Evaluation of heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holsteins in a temperate environment. *J. Dairy Sci.* 96:1844-1855.
- Hansen, P. J., M. Drost, R. M. Rivera, L. F. F. Paula, , Y. M. Al-Katanani, C. E. Krininger III and Chase Jr., C. C. 2001. Adverse impact of heat stress on embryo production: causes and strategies for mitigation. *Theriogenology* 55:91-103.
- Hansen, P. J. 2004. Physiological and cellular adaptations of zebu cattle to thermal stress. *Anim. Reprod. Sci.* 82:349-360.
- Hansen, P. J. 2013. Genetic control of heat stress in dairy cattle. In Proceedings of the 49th Florida Dairy Production Conference, Gainesville, Florida, USA, April 10, 26-32.
- Harmon, R. J., M. Lu, D. S. Trammel, B. A. Smith, J. N. Spain and D. Spiers. 1997. Influence of heat stress and calving on antioxidant activity in bovine blood. *J. Dairy Sci.* 80(Suppl. 1):264.
- Hayes, B. J., M. Carrick, P. Bowman and M. E. Goddard. 2003. Genotype x environment interaction for milk production of daughters of Australian dairy sires from test-day records. *J. Dairy Sci.* 86:3736-3744.
- Hayes, B. J., H. A. Lewin and M. E. Goddard. 2013. The future of livestock breeding: genomic selection for efficiency, reduced emissions intensity, and adaptation. *Trends in Genet.* 29:206-214.
- Horn, P. 2008. Emerging challenges for animal production, dangers and opportunities. *Acta Agric. Slov. (Suppl. 2):*5-11.
- Hubbard, K. G., D. E. Stooksbury, G. L. Hahn and T. L. Mader. 1999. A climatological perspective on feedlot cattle performance and mortality related to the temperature-humidity index. *J. Prod. Agric.* 12:650-653.

- Ingraham, R. H., D. D. Gillette and W. D. Wagner. 1974. Relationship of temperature and humidity to conception rate of Holstein cows in subtropical climate. *J. Dairy Sci.* 57:476-481.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC: AR4). 2007. The Intergovernmental Panel on Climate Change 4th Assessment Report.
- {HYPERLINK  
“[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_reports.htm#2](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.htm#2)”}
- Fecha: 08-01-2016.
- Jamrozik, J. and L. R. Schaeffer. 1997. Estimates of genetic parameters for a test day with random regression for production of first lactation. *J. Dairy Sci.* 80:762-770.
- Jenkinson, D. M. and R. M. Mabon. 1973. The effects of temperature and humidity on skin surface pH and the ionic composition of skin secretions in Ayrshire cattle. *Brit. Vet. J.* 129:282–295.
- Johnston, J. E., F. B. Hamblin and G. T. Schrader. 1958. Factors concerned in the comparative heat tolerance of Jersey, Holstein and Red Sindhi-Holstein (F) cattle. *J. Anim. Sci.* 17:473-479.
- Kadzere, C. T., M. R. Murphy, N. Silanikove and E. Maltz. 2002. Heat stress in lactating dairy cows: a review. *Livest. Prod. Sci.* 77:59-91.
- Karimi, M. T., G. R. Ghorbani, S. Kargar and J. K. Drackley. 2015. Late-gestation heat stress abatement on performance and behavior of Holstein dairy cows. *J. Dairy Sci.* 98:6865-6875.
- Khalifa, H. H. 2003. Bioclimatology and adaptation of farm animals in a changing climate. In *Interactions between climate and animal production. Proc. Symp.* 7:15-29.

- Keister, Z. O., K. D. Moss, H. M. Zhang, T. Teegerstrom, R. A. Edling, R. J. Collier and R. L. Ax. 2002. Physiological responses in thermal stressed Jersey cows subjected to different management strategies. *J. Dairy Sci.* 85:3217-3224.
- Kolmodin, R., E. Strandberg, P. Madsen, J. Jensen and H. Jorjani. 2002. Genotype by environment interaction in Nordic dairy cattle studied using reaction norms. *Acta Agr. Scand. A-An.* 52:11-24.
- Leyva-Corona. J. C., P. V. Félix, M. I. Morales-Pablos, G. J. Grageda, J.G. Quintana y B. G. Ramírez. 2008a. Análisis de riesgo al estrés calórico en hatos lecheros del sur de sonora utilizando la climatología de la región. En la XVIIIª Reunión Internacional sobre producción de Carne y Leche en Climas Cálidos, 2 y 3 de Octubre de 2008, Mexicali Baja California, México.
- Leyva-Corona. J. C., P. V. Félix, P. Luna-Nevárez, M. I. Morales-Pablos y G. J. Grageda. 2008b. Impacto de las condiciones climáticas de verano en el Valle del Yaqui sobre el desempeño productivo del ganado lechero. En la XVIII Reunión Internacional sobre Producción de Carne y Leche en Climas Cálidos, 2 y 3 de Octubre de 2008, Mexicali, Baja California, México.
- Leyva-Corona, J. C., R. Zamorano-Algandar, D. I. Castelo, F. Rivera-Acuña, M. G. Méndez-Castillo y A. Correa-Calderón. 2012. Incrementar la frecuencia de baños mitiga el estrés calórico en el ganado Holstein en un clima semihúmedo. En la XXII Reunión Internacional sobre Producción de Carne y Leche en Climas Cálidos, dentro de la 2da Reunión Internacional Conjunta de Manejo de Pastizales y Producción Animal. Zacatecas, México.

- Liu, Y. X., X. Zhou, D. Q. Li, Q. W. Cui and G. L. Wang. 2010. Association of ATP1A1 gene polymorphism with heat tolerance traits in dairy cattle. *Genet. Mol. Res.* 9:891-896.
- Mader, T. L., J. M. Dahlquist and G. L. Hahn. 1997. Wind protection effects and airflow patterns in outside feedlots. *J. Anim. Sci.* 75:26-36.
- Mader, T. L., M. S. Davis and T. Brown-Brandl. 2006. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 84:712-719.
- Matukumalli, L. K., C. T. Lawley, R. D. Schnabel, J. F. Taylor, M. F. Allan, M. P. Heaton, J. O'Connell, S. S. Moore, P. L. Smith, T. S. Sonstegard and C. P. Van Tassell. 2009. Development and characterization of a high density SNP genotyping assay for cattle. *Plos One.* 4:e5350.
- Mauger, G., Y. Bauman, T. Nennich and E. Salathé, E. 2015. Impacts of climate change on milk production in the United States. *Prof. Geogr.* 67:121-131.
- McDowell, R. E., J. C. Wilk and C. W. Talbott. 1996. Economic viability of crosses of *Bos taurus* and *Bos indicus* for dairying in warm climates. *J. Dairy Sci.* 79:1292-1303.
- McManus, C., E. Prescott, G. R. Paludo, E. Bianchini, H. Louvandini and A. S. Mariante. 2009. Heat tolerance in naturalized Brazilian cattle breeds. *Livest. Sci.* 120:256–264.
- McMillan, A. M. and J. H. Van der Werf. 2007. Genetic variation in rectal temperature and its association with heat tolerance in Australian dairy cattle. In *Proc. Assoc. Advmt. Anim. Breed. Genet.* 17:553-556.
- Menéndez-Buxadera, A., A. Molina, F. Arrebola, I. Clemente and J. M. Serradilla. 2012. Genetic variation of adaptation to heat stress in two Spanish dairy goat breeds. *J. Anim. Breed. Genet.* 129: 306-315.

- Menéndez-Buxadera, A., J. M. Serradilla, F. Arrebola, I. Clemente, J. A. Castro, J. Osorio, R. Torres and A. Molina. 2013 Genetic variation for tolerance to heat stress in dairy small ruminants: Results obtained in Spain. In the 8th International Seminar of the FAO-CIHEAM Network on Sheep and Goats. Marruecos. 108:67-73.
- Menéndez-Buxadera, A., J. M. Serradilla and A. Molina. 2014. Genetic variability for heat stress sensitivity in Merino de Grazalema sheep. *Small Ruminant Res.* 121:207-214.
- Morton, J. M., W. P. Tranter, D. G. Mayer and N. N. Jonsson. 2007. Effects of environmental heat on conception rates in lactating dairy cows: Critical periods of exposure. *J. Dairy Sci.* 90:2271-2278.
- Mousa, N. N. and M. Y. Elkalifa. 1992. Effects of water deprivation on dry matter intake, dry matter digestibility, and nitrogen in Sudan desert lambs and kids. *Small Ruminant Res.* 6:311-316.
- National Cooperative Dairy Herd Improvement Program Handbook (NCDHIP). 1988. J. L. Majeskie, ed. The Univ. Maryland, College Park, USA.
- Nieuwhof, G. J., H. D. Norman and F. N. Dickinson. 1989. Phenotypic trends in herd life of dairy cows in the United States. *J. Dairy Sci.* 72:726-736.
- NRC. 2001. Nutrient requirements of dairy cattle. 7th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Olson, T. A., C. Lucena, C. C. Chase and A. C. Hammond. 2003. Evidence of a major gene influencing hair length and heat tolerance in cattle. *J. Anim. Sci.* 81:80-90.
- Oltenacu, P. A. and D. M. Broom. 2010. The impact of genetic selection for increased milk yield on the welfare of dairy cows. *Anim. Welf.* 19:39-49.

- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2009. Codex alimentarius: producción de alimentos de origen animal (2 Edic.) Roma, Italia. {HYPERLINK “<http://www.fao.org/docrep/012/i1400e/i1400e.pdf>”}
- Recuperado: 08-01-2016.
- Pareek, C. S., R. Smoczynski and A. Tretyn. 2011. Sequencing technologies and genome sequencing. *J. Appl. Genet.* 52:413-435.
- Peña, D. G., D. G. Iglesias, J. L. E. Villavicencio, A. Palacios-Espinosa and R. D. L. de la Peña. 2007. Estimación de componentes de (CO) varianza para la producción de leche del día del control en ganado Siboney utilizando un modelo de regresión aleatoria. *Interciencia* 32:702-706.
- Perano, K. M., J. G. Usack, L. T. Angenent and K. G. Gebremedhin. 2015. Production and physiological responses of heat-stressed lactating dairy cattle to conductive cooling. *J. Dairy Sci.* 98:5252-5261.
- Pereira, A. M. F., E. L. Titto, P. Infante, C. G. Titto, A. M. Geraldo, A. Alves, T. M. Leme, F. Baccari Jr. and J. A. Almeida. 2014. Evaporative heat loss in *Bos taurus*: Do different cattle breeds cope with heat stress in the same way? *J. Thermal Biol.* 45:87-95.
- Posadas, M. E., M. M. Quiroz, B. A. Olguin, G. C. Reza y C. P. Cano. 2000. Sistemas de Producción Animal 1: Bovinos. Volumen II. DSUA-FMVZ. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
- { HYPERLINK “[http://www.fmvz.unam.mx/fmvz/e\\_bovina/Bibliografia.pdf](http://www.fmvz.unam.mx/fmvz/e_bovina/Bibliografia.pdf)”}
- Recuperado: 08-01-2016.

- Posadas, M. V., F. J. R. López y H. H. M. Valdenegro. 2004. Estimación de parámetros genéticos para características de longevidad y producción de leche en ganado Holstein en México. *Interciencia* 29:52-56.
- Precht, H., J. Christophersen, H. Hensel and W. Larcher. 1973. Heat exchange with the environment. In *Temperature and Life*. Springer Berlin Heidelberg. Pp. 545-564.
- Rauw, W. M., E. Kanis, E. N. Noordhuizen-Stassen and F. J. Grommers. 1998. Undesirable side effects of selection for high production efficiency in farm animals: a review. *Livest. Prod. Sci.* 56:15-33.
- Rauw, W. M. 2008. *Resource Allocation Theory Applied to Farm Animals*. CAB International: Wallingford, UK.
- Ravagnolo, O. and I. Misztal. 2000. Genetic component of heat stress in dairy cattle, parameter estimation. *J. Dairy Sci.* 83:2126-2130.
- Ravagnolo, O. and I. Misztal. 2002. Effect of heat stress on nonreturn rate in Holstein cows: Genetic analyses. *J. Dairy Sci.* 85:3092-3100.
- Renaudeau, D., A. Collin, S. Yahav, V. De Basilio, J. L. Gourdine and R. J. Collier. 2012. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. *Animal* 6:707-728.
- Rivera-Acuña, F., E. Prado-Martínez, P. Luna-Nevárez, M. G. Méndez-Castillo, L. Avendaño-Reyes, J. F. Hernández-Chávez, J. L. Espinoza-Villavicencio, J. Hernández-Cerón and A. Correa-Calderón. 2015. Induction of lactation in Holstein cows using progesterone injections or progesterone vaginal inserts. *Iranian J. Appl. Anim. Sci.* 5:13-20.

- Ryan, D. P., M. P. Boland, E. Kopel, D. Armstrong, L. Munyakazi, R. A. Godke and R. H. Ingraham. 1992. Evaluating two different evaporative cooling management systems for dairy cows in a hot, dry climate. *J. Dairy Sci.* 75: 1052-1059.
- Rhoad, A. O. 1944. The Iberia heat tolerance test for cattle. *Trop. Agr.* 21:162-164.
- Rhoads, M. L., R. P. Rhoads, M. J. VanBaale, R. J. Collier, S. R. Sanders, W. J. Weber, B. A. Crooker and L. H. Baumgard. 2009. Effects of heat stress and plane of nutrition on lactating Holstein cows: I. Production, metabolism, and aspects of circulating somatotropin. *J. Dairy Sci.* 92:1986-1997.
- Ruíz C., J. A., G. Medina, G. J. Grageda, M. M. Silva and P. G. Díaz. 2005. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Sonora (período 1961-2003). Libro Técnico Núm. 1. INIFAP-CIRNO. Cd. Obregón, Sonora, México. 171 pp.
- Sahota, R. S. and G. S. Gill. 1991. Genotype  $\times$  environment interaction for some traits of economic importance of dairy cattle. *J. Res. Punjab Agric. Univ.* 28:3395–3400.
- Sánchez, J. P., I. Misztal, I. Aguilar, B. Zumbach and R. Rekaya. 2009. Genetic determination of the onset of heat stress on daily milk yield in US Holstein cattle. *J. Dairy Sci.* 92:4035–4045.
- Santana, M. L., R. J. Pereira, A. B. Bignardi, A. E. Vercesi-Filho, A. Menéndez-Buxadera and L. El Faro. 2015. Detrimental effect of selection for milk yield on genetic tolerance to heat stress in purebred Zebu cattle: Genetic parameters and trends. *J. Dairy Sci.* 98:9035-9043.
- Sajjanar, B., R. Deb, U. Singh, S. Kumar, M. Brahmane, A. Nirmale, S. Kumar Bal and P. S. Minhas. 2015. Identification of SNP in HSP90AB1 and its association with the relative thermotolerance and milk production traits in Indian dairy cattle. *Anim. Biotechnol.* 261:45-50.

- Schultz, T. A. 1988. California dairy corral manger mister installation. ASAE Paper No. 88-4056, ASAE, St. Joseph, MI.
- Schütz, K. E., A. R. Rogers, N. R. Cox and C. B. Tucker. 2009. Dairy cows prefer shade that offers greater protection against solar radiation in summer: Shade use, behavior, and body temperature. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 116:28-34.
- Schütz, K. E., A. R. Rogers, Y. A. Poulouin, N. R. Cox and C. B. Tucker,. 2010. The amount of shade influences the behavior and physiology of dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 93:125-133.
- Seath, D. M. 1947. Heritability of heat tolerance in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 30:137-144.
- Seath, D. M. and G. D. Miller. 1948. Effect of water sprinkling with and without air movement on cooling dairy cows. *J. Dairy Sci.* 31:361.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2014. Segundo informe de gobierno 2013-2014. Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, Presidencia de la República. 2:549. { HYPERLINK “[http://cdn.presidencia.gob.mx/segundoinforme/Segundo\\_Informe\\_escrito\\_completo.pdf](http://cdn.presidencia.gob.mx/segundoinforme/Segundo_Informe_escrito_completo.pdf)”} Recuperado: 08-01-2016.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2014a. Resumen nacional producción, precio, valor, animales sacrificados y peso 2013. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Página Web: {HYPERLINK “<http://www.siap.gob.mx/resumen-nacional-pecuario/>”} Recuperado el: 08-01-2016.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2014b. Infografía Agroalimentaria de Sonora 2014. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca Y Alimentación. 1:47-49.

{ HYPERLINK "<http://www.siap.gob.mx/resumen-nacional-pecuario/>" }

Recuperado el: 08-01-2016.

Shwartz, G., M. L. Rhoads, M. J. VanBaale, R. P. Rhoads and L. H. Baumgard. 2009. Effects of a supplemental yeast culture on heat-stressed lactating Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 92:935-942.

Silanikove, N. 1992. Effects of water scarcity and hot environments on appetite and digestion in ruminants: a review. *Livest. Prod. Sci.* 30:175-194.

Singh, S. V., S. Soren, A. K. Singh and S. Kumar. 2013. Heat Tolerance Indices for Cattle and Buffalo. In Singh, S. V., Upadhyay, R. C., Sirohi, S. and Singh, A. K. (Eds.), *Climate Resilient Livestock and Production System.* 270-272. Karnal, Haryana, India. Intech Printers and Publishers.

Smith, J. F., D. V. Armstrong and J. Harner. 1999. What we learned about cooling cows. Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy.

{ HYPERLINK "<http://purl.umn.edu/118857>" } Recuperado: 08-01-2016.

Srikandakumar, A. and E. H. Johnson. 2004. Effect of heat stress on milk production, rectal temperature, respiratory rate and blood chemistry in Holstein, Jersey and Australian Milking Zebu cows. *Trop. Anim. Health Prod.* 36:685-692.

St-Pierre, N. R., B. Cobanov and G. Schnitkey. 2003. Economic losses from heat stress by US livestock industries. *J. Dairy Sci.* 86:E52–E77.

Strickland, J. T., R. A. Bucklin, R. A. Nordstedt, D. K. Beede and D. R. Bray. 1989. Sprinkler and fan cooling systems for dairy cows in hot, humid climates. *Appl. Eng. Agric.*, 5:231-236.

Thom, E. C. 1959. The discomfort index. *Weatherwise* 12:57-59.

- Tucker, C. B., A. R. Rogers and K. E. Schütz. 2008. Effect of solar radiation on dairy cattle behaviour, use of shade and body temperature in a pasture-based system. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 109:141-154.
- Valtorta, S. E., M. R. Gallardo, H. C. Castro and M. E. Castelli. 1996. Artificial shade and supplementation effects on grazing dairy cows in Argentina. *Trans. Amer. Soc. Agric. Eng.*, 39: 233.
- Van Dorp, T. E., J. C. M. Dekkers, S. W. Martin and J. P. T. M. Noordhuizen. 1998. Genetic parameters of health disorders, and relationships with 305-day milk yield and conformation traits of registered Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 81:2264-2270.
- Van Soest, P. J. 1994. *Nutritional ecology of the ruminant*. Second edition. Cornell University. United States of America.
- Vargas, B., A. F. Groen, M. Herrero and J. A. Van Arendonk. 2002. Economic values for production and functional traits in Holstein cattle of Costa Rica. *Livest. Prod. Sci.* 75:101-116.
- Wayman, O., H. D. Johnson, C. P. Merilan, and I. L. Berry. 1962. Effect of ad libitum or force-feeding of two rations on lactating dairy cows subject to temperature stress. *J. Dairy Sci.* 45:1472–1478.
- West, J. W. 1994. Interactions of energy and bovine somatotropin with heat stress. *J. Dairy Sci.* 77:2091-2102.
- West, J. W. 1999. Nutritional strategies for managing the heat-stressed dairy cow. *J. Anim. Sci.* 77:21-35.
- West, J. W. 2003. Effects of heat stress on production in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 86:2131-2144.

- West, J. W., B. G. Mullinix and J. K. Bernard. 2003. Effects of hot, humid weather on milk temperature, dry matter intake, and milk yield of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 86:232-242.
- Wolfenson, D., Z. Roth and R. Meidan. 2000. Impaired reproduction in heat-stressed cattle: basic and applied aspects. *Anim. Reprod. Sci.* 60:535-547.
- Yousef, M. K. 1985. *Stress Physiology in Livestock*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Zidi, A., H. Abo-Shady, A. Molina, A. Menéndez-Buxadera, M. Sánchez-Rodríguez, C. Díaz, M. J. Carabaño and J. M. Serradilla. 2014. Genome Wide Association for Heat Stress Tolerance/Susceptibility in Florida Dairy Goats. In: 10th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production. 17-22 August, Vancouver, BC, Canada. 340-343.
- Zimbelman, R. B., R. P. Rhoads, M. L. Rhoads, G. C. Duff, L. H. Baumgard and R. J. Collier. 2009. A re-evaluation of the impact of temperature humidity index (THI) and black globe humidity index (BGHI) on milk production in high producing dairy cows. In *Western Dairy Management Conference*, 9-11 March, Reno, Nevada, USA. 113-126.
- Zimbelman, R. B., R. J. Collier and M. Eastridge. 2011. Feeding strategies for high-producing dairy cows during periods of elevated heat and humidity. In: *Proc. 20th Annual Tri-State Dairy Nutrition Conference*, Fort Wayne, USA, 111–126.